

30-0106/001

Verbundverhalten von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund in Abhängigkeit von Größe und Dauer der Schwellbeanspruchung

A b s c h l u ß b e r i c h t

Vorgelegt von

o.Prof. Dr.-Ing. Karl Kordina
und
Dr.-Ing. V. Weber

Braunschweig, Januar 1985

Gefördert mit Forschungsmitteln des Deutschen Ausschusses
für Stahlbeton
(Förderungsnummer: N VII V215)

BIBLIOTHEK
Institut für Baulehre, Maschinenbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Inhaltsverzeichnis

Seite

1	Zielsetzung, Problemstellung	2
2	Oberblick über die bisherigen Untersuchungen	5
3	Durchgeführte Untersuchungen	9
	3.1 Umfang der Untersuchungen	9
	3.2 Prüfkörperherstellung	9
	3.3 Versuchseinrichtung und Meßeinrichtung	10
	3.4 Versuchsdurchführung	12
4	Auswertung und Beurteilung der Versuchsergebnisse .	13
	4.1 Allgemeines	13
	4.2 Verbundverhalten dauerschwellbeanspruchter gerippter Spannstähle	16
	4.3 Verbundverhalten dauerschwellbeanspruchter glatter Spannstähle	20
	4.4 Verbundverhalten dauerschwellbeanspruchter Litzenspannglieder	22
5	Zusammenfassung	23
6	Literaturverzeichnis	26
7	Anlagen	28

Vorwort

Die zu den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen zum "Verbundverhalten von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund in Abhängigkeit von Größe und Dauer der Schwellbeanspruchung" erforderlichen Mittel stellte der Deutsche Ausschuß für Stahlbeton zur Verfügung. Die Mitglieder der Beratergruppe die Herren

Dr.-Ing. D.Jungwirth,

Prof. Dr.-Ing. H.Kupfer,

Prof. Dr.-Ing.Dr.-Ing.h.c. H.Trost

und

Dr.-Ing. E.Wölfel

haben das Vorhaben durch Anregungen und Ratschläge wesentlich unterstützt.

Dank gebührt auch Herrn Dipl.-Ing. Carlos Sanabria aus Paraguay für seine Mitarbeit bei der experimentellen Durchführung sowie Auswertung der Versuche.

Die Verfasser danken allen Mitwirkenden.

1 Zielsetzung, Problemstellung

Bei Stahlbetonbauteilen wird die Verbundwirkung der Betonstähle planmäßig ausgenutzt, um zum einen im Gebrauchszustand die Breite auftretender Risse auf ein unbedenkliches Maß zu begrenzen und zum anderen, um im Bruchzustand die sichere Verankerung der Stahlzugkräfte zu gewährleisten. Daneben ist die Verbundwirkung der Betonstähle gefordert, um die Differenzkräfte aus dem der Schubbemessung zugrundegelegten Fachwerkmodell im Zuggurt zu verankern.

Um die Vielzahl der Parameter aufzuzeigen und zu quantifizieren, die das Verbundverhalten der Betonstähle beeinflussen, sind hierzu in den vergangenen Jahrzehnten im In- und Ausland zahlreiche experimentelle und theoretische Untersuchungen durchgeführt worden (z. B. /7, 8, 9/).

Demgegenüber interessierte bis vor kurzem die Verbundwirkung von Spanngliedern bei nachträglichem Verbund kaum, da diese zur Gewährleistung einer dauerhaft befriedigenden Gebrauchstüchtigkeit und zur Sicherung einer ausreichenden Bruchsicherheit nur ausnahmsweise gefordert war. Lediglich bei Spannbetonbauteilen mit Vorspannung mit sofortigem Verbund oder im Bereich der Endverankerung einzelner Spannverfahren wird die Verbundwirkung der Spannglieder zur Einleitung der Vorspannkräfte benötigt; mit dem hierbei auftretenden Problem beschäftigen sich unter anderem die Untersuchungen von Kupfer /6/ sowie Martin /8/.

Bei üblichen Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund kann davon ausgegangen werden, daß infolge der stets vorhandenen zumindest beschränkten Vorspannung im Gebrauchszustand kaum Risse infolge planmäßig einwirkender Beanspruchungen auftreten; die Breite dennoch eintretender Risse, beispielsweise verursacht durch das ungünstige Zusammentreffen von Last- und Zwangbeanspruchungen, kann durch die in allen Fällen vorhandene Betonstahlbewehrung dauerhaft verlässlich auf ein im Hinblick auf den Korrosionsschutz der Spannglieder unbedenkliches Maß beschränkt werden.

Im Gebrauchs- und Bruchzustand wird die Verbundwirkung der Spannglieder im wesentlichen nur benötigt, um auch die bei Spannbetonkonstruktion zugrundegelegte Fachwerkanalogie sicherzustellen /11/. Die hierbei auftretenden Verbundbeanspruchungen sind allerdings nur von untergeordneter Bedeutung.

Mit Einführung der teilweisen Vorspannung sowie der Segmentbauart stieg das Interesse am Verbundverhalten von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund beträchtlich, da in beiden vorgenannten Fällen das Auftreten von Rissen im Gebrauchszustand entweder toleriert bzw. nicht vollständig ausgeschlossen werden kann und darüberhinaus die Betonstahlbewehrung so dimensioniert bzw. angeordnet wird, daß sie allein keine ausreichende Rißbreitenbeschränkung gewährleisten kann (teilweise Vorspannung) bzw. zur Fugenspaltbreitenbeschränkung nicht aktiviert werden kann (Segmentbauweise).

In beiden Fällen ist es aber erforderlich, zur Sicherung einer hinreichend befriedigenden Gebrauchstüchtigkeit auftretende Biegerisse auf ein unschädliches Maß zu begrenzen, um den besonders korrosionsempfindlichen Spannstahl gegen den Angriff aggressiver Medien dauerhaft zu schützen /5/. Bei teilweise vorgespannten Konstruktionen erfüllt die einliegende Betonstahlbewehrung gemeinsam mit der Spannbewehrung diese Aufgabe. Daher ist hier das Verbundverhalten der Spannglieder mit nachträglichem Verbund nur im Zusammenwirken mit dem Betonstahl von Interesse. Demgegenüber sind die Verhältnisse bei Segmentbauteilen völlig anders gelagert /5, 15/:

Im Segmentbau sind mit den Segmentfugen quasi "Sollrißstellen" vorgegeben. Deshalb muß bei auftretenden Biegezugbeanspruchungen davon ausgegangen werden, daß sich erste Risse im Bereich der Segmentfugen zeigen. In diesen Bauteilabschnitten ist jedoch keine Betonstahlbewehrung vorhanden, da konstruktionsbedingt die Segmentfugen nicht von einer Betonstahlbewehrung durchsetzt werden können.

Somit fällt ausschließlich der einliegenden Spannstahlbewehrung die Aufgabe zu, diese Risse auf ein unbedenkliches Maß zu beschränken. Diese Forderung kann nicht nur mit der Einhaltung einer vollen bzw. übervollen Vorspannung erfüllt werden, da hiermit insbesondere Zugspannungen infolge ungewollter Zwangbeanspruchung nicht verhindert werden können. Vielmehr erwies es sich als notwendig, konstruktive Regelungen bereitzustellen, die auf dem Verbundverhalten der Spannglieder mit nachträglichem Verbund aufbauen und bei deren Beachtung eine zuverlässige Spaltbreitenbegrenzung möglich ist.

Zur Klärung dieser Frage wurden in jüngster Zeit hauptsächlich in Deutschland einige eingehende Untersuchungen zum Verbundverhalten von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund durchgeführt, in deren Rahmen die wesentlichen, das Verbundverhalten von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund beeinträchtigenden Parameter aufgezeigt und zum Teil auch quantifiziert wurden.

Erste eingehende Untersuchungen hierzu wurden von Trost et al. /13/ durchgeführt, die das Verbundverhalten handelsüblicher Spanngliedarten unter praxisüblichen Beanspruchungen labormäßig untersuchten.

Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse sind von Weber /14/ ausgewertet, theoretisch aufbereitet und zu Verbundspannungs- Grundbeziehungen zusammengefaßt worden.

Anhand darauf aufbauender weiterer Untersuchungen war es möglich, insbesondere das Rißverhalten von Segmentbauteilen so eingehend zu beschreiben, daß hieraus Rißgesetze abgeleitet werden konnten, die in den Weißdruck von DIN 4227 Teil 3 (Spannbeton, Bauteile in Segmentbauart /1/) eingegangen sind und bei deren Beachtung es möglich ist, die unter außergewöhnlicher Biegebeanspruchungen auftretenden Fugenspaltbreiten auf ein unbedenkliches Maß einzugrenzen.

Für Spannbetonbauteile mit teilweiser Vorspannung wertete Thormählen /12/ die von Trost et al. /13/ durchgeführten Versuche aus und faßte auch diese zu Ausführungsregelungen zusammen, bei deren Beachtung der zur Rißbreitenbegrenzung erforderliche Betonstahlbewehrungsgrad um den anteilig mitwirkenden Spannstahlbewehrungsgrad reduziert werden kann.

Alle diese Untersuchungen gehen jedoch von statischen Verbundspannungs- Verschiebungsbeziehungen aus und unterdrücken den Einfluß einer Wechselbeanspruchung. Gerade bei Einwirken einer Wechselbeanspruchung muß jedoch davon ausgegangen werden, daß sich im Falle des Auftretens von Fugenöffnungen bzw. Rißbildungen zusätzliche Verbundstörungen ergeben, die zu einer Vergrößerung der vorhandenen Fugenöffnungen bzw. Rißbreiten führen.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens sollte deshalb untersucht werden, in welchem Maße praxisübliche Dauerschwellbeanspruchungen das Verbundverhalten von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund beeinflussen und Wege aufgezeigt werden, um die möglichen ungünstigen Einflüsse auf das Verbundverhalten beim Nachweis der Fugenspalt- bzw. Rißbreitenbegrenzung zu berücksichtigen.

2 Überblick über die bislang durchgeführten Untersuchungen

Das Verbundverhalten von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund ist von Trost et al. /13/ systematisch experimentell untersucht und die Auswirkung der wesentlichen Parameter auf das Verbundverhalten aufgezeigt worden; in /14/ sind diese Untersuchungen zur Formulierung theoretischer Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehungen benutzt worden.

Zum Einfluß von Wechselbeanspruchungen auf das Verbundverhalten von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund liegen bislang erst einige Tastuntersuchungen vor, anhand derer

lediglich generelle Zusammenhänge durch Vergleich mit entsprechend statisch belasteten Prüfkörpern aufgezeigt werden können: So wurde in /13/ an üblichen Pull-out-Prüfkörpern mit Spanngliedern mit nachträglichem Verbund der Einfluß von insgesamt 5 Lastwechselbeanspruchungen auf das Verbundverhalten untersucht. Die Einbettungslänge der Spannglieder betrug $5 d_v$ (d_v = Spannglieddurchmesser); wobei glatte Einzelstäbe, Litzen, Drähte sowie gerippte Stäbe, geprüft wurden.

Bei diesen Untersuchungen zeigte sich:

- Die Auswirkung dieser Lastwechselbeanspruchungen auf das Verbundverhalten ist bei glatten Stäben und Litzen deutlich anders als bei profilierten bzw. gerippten Stäben.
- Eine Vergrößerung des Verschiebungsweges führte anfänglich stets zu einem Anstieg der aufnehmbaren Verbundspannungen; der aufnehmbare Maximalwert lag allerdings in der Regel niedriger als der Maximalwert der bei einsinniger Belastung aufgenommen werden konnte.
- Die maximalen Verbundspannungen wurden bei unterschiedlich großen Verschiebungswegen erreicht.
- Wurden die Verschiebungen über den zur maximalen Verbundspannung gehörigen Verschiebungsweg hinaus gesteigert, führte dies zusammen mit der ansteigenden Zahl der durchgeführten Lastspiele bei glatten Stäben und Spannstahllitzen zu einem deutlichen Absinken der aufnehmbaren Verbundbeanspruchung; ähnliches konnte bei gerippten und profilierten Stählen nicht beobachtet werden.
- Die Untersuchungen zeigten ferner, daß im Unterschied zu statisch belasteten Prüfkörpern erst dann eine nennenswerte Abminderung der aufnehmbaren Verbund-

spannungen auftrat, wenn bei wechselnder Belastung Verbundbeanspruchungen auftraten, die die maximal aufnehmbare Verbundspannung fast erreichten.

- Die durch die Verbundbeanspruchung erzeugten Verschiebungen gingen bei Entlastung nur teilweise wieder zurück; die Rückverformung war aber um so größer, je mehr der Verbundmechanismus vom Scherverbund bestimmt wurde.
- Bei profilierten Stäben und Litzen war die Rückstellkraft (d. h. die Kraft die erforderlich war, um die Verbundverschiebungen wieder auf Null zu reduzieren) deutlich kleiner als bei glatten Stäben, wo der Verbundmechanismus im wesentlichen durch den irreversiblen Haftverbund beschrieben werden kann.,

In /3/ wurde das Verbundverhalten von gerippten Betonstählen infolge wiederholter Last beobachtet:

Die Verbundlänge der Stäbe betrug 38 mm, der Stahldurchmesser 16 mm, die Betonüberdeckung betrug 35 bzw. 25 mm. Die Belastung erfolgte derart, daß bei einer Unterlast von $F = 0$ kN die Oberlast so angesteuert wurde, daß sich Verbundspannungen von 2,0, 3,9 bzw. 5,6 N/mm² einstellten. Jede Versuchsvariante wurde viermal getestet, so daß sich insgesamt 24 Versuche ergaben; die Schwellbeanspruchung setzte sich jeweils aus insgesamt 9 Lastwechseln zusammen.

Die bei diesen Untersuchungen gewonnen Ergebnisse stellen sich wie folgt dar:

- Bei wiederholter Belastung wurden nach der Entlastung bleibende Verschiebungen gemessen.
- Das Verbundverhalten der untersuchten Stäbe wurde im wesentlichen durch die größte aufgebrachte Verbundbeanspruchung (d. h. die Lastgeschichte) beeinflusst und weniger durch die Anzahl der vorher aufgebrachten Lastwiederholungen.

- Die größten Verschiebungszunahmen wurden nach der ersten Wiederbelastung gemessen, weitere Belastungen brachten keine wesentlichen Verschiebungszunahmen.
- Die Betonüberdeckung hatte nur einen untergeordneten Einfluß auf das Verbundverhalten.
- Je höher die Verbundbeanspruchungen waren, um so größer waren auch die zugeordneten absoluten Verschiebungen.

In /10/ wurde das Verbundverhalten von Betonstäben in insgesamt 308 Pull-Out Versuchen studiert, wobei als Versuchsparameter die maximale Last, die Lastamplitude, der Stabdurchmesser, die Betongüte sowie die Verbundlänge gewählt wurden.

Diese Untersuchungen zeigten in bezug auf den Einfluß der Lastamplitude auf das Verbundverhalten derartiger Betonstäbe, daß

- die aufnehmbare Lastwechselzahl mit abnehmender Schwingbreite ansteigt, wobei kein Einfluß der Betongüte und des Durchmessers festgestellt werden konnte; für das Verbundverhalten waren lediglich die maximal erreichte Stahlspannung sowie die Stahlspannungsamplitude maßgebend und
- die Verschiebungen während der Lastwiederholung in Abhängigkeit von Verbundlänge und Größe der Oberlast anwachsen.

3 Durchgeführte Untersuchungen

3.1 Umfang der Untersuchungen

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens sollte das Verbundverhalten von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund in Abhängigkeit von der Höhe und der Dauer der einwirkenden Schwellbeanspruchung unter Zugrundelegung praxisüblicher Werte studiert werden.

Um in Anbetracht knapper Forschungsmittel den experimentellen Versuchsaufwand in Grenzen zu halten, wurden für diese Untersuchungen drei repräsentative Spanngliedarten ausgewählt: Gewindestäbe (\emptyset 26,5 mm,) glatte Stäbe (\emptyset 26,0 mm) sowie Spannstahllitzen (7 \emptyset 5,2 mm).

Insgesamt wurden 39 Versuche durchgeführt; einen Überblick über die ausgeführten Untersuchungen gibt Anlage 1.

Begleitend zu diesen Untersuchungen wurden die Festigkeiten der verwendeten Einpreßmörtel in Anlehnung an DIN 4227 Teil 5 /2/ überprüft.

3.2 Prüfkörperherstellung

Ausbildung und Abmessungen der Pull-Out Prüfkörper sind in Bild 1 dargestellt.

Es wurden handelsübliche Hüllrohre mit einem Innendurchmesser von 38 mm bei einem Außendurchmesser von 43 mm verwendet. Der umhüllende Beton entsprach bei allen Versuchskörpern der Festigkeitsklasse B 35.

Im ersten Herstellabschnitt wurde der Hüllbeton eingebracht, wobei darauf geachtet wurde, daß die exakt 13 cm langen Hüllrohrabschnitte mittig und senkrecht in die Prüfkörper eingebaut wurden.

Zwei Wochen nach Herstellung dieser Prüflinge erfolgte der

Einbau der Spannglieder, wozu die Prüfkörper in eine eigens konstruierte Justiereinrichtung eingebaut wurden, um die Spannglieder exakt mittig im Hüllrohr ausrichten zu können.

Nachfolgend wurden die Hüllrohre am unteren Ende sorgfältig versiegelt und der Injektionsmörtel von oben ins Hüllrohr eingefüllt, wobei durch Stochern eine gute Verdichtung sichergestellt wurde.

Der Injektionsmörtel wurde gemäß DIN 4227 Teil 5 /2/ mit einem Wasserzementwert von 0,44 hergestellt und im Zuge des Verfüllens der Hüllrohre Rückstellproben zur Bestimmung der Mörtelfestigkeit sowie des Absetz- bzw. Quellmaßes produziert.

Alle Probekörper lagerten bis zum Versuchsbeginn in der Justiereinrichtung, um so eine Vorschädigung des Verbundes durch unbeabsichtigte Beanspruchungen mit Sicherheit auszuschließen.

Alle zur Herstellung der Versuchskörper verwendeten Spannstäbe waren vorschriftsmäßig gelagert, so daß sie frei von Flugrost und sonstigen den Verbund beeinträchtigenden Oberflächenverunreinigungen waren.

3.3 Versuchseinrichtung und Meßeinrichtung

Bild 1 verdeutlicht den Versuchsaufbau sowie die Meßeinrichtung.

Bei allen Versuchen wurde der Schlupf am unbelasteten Stabende mit einem induktiven Wegaufnehmer registriert.

Dabei wurde der Schlupf bei den statischen Versuchen kontinuierlich aufgezeichnet, während die Verschiebungen bei den dynamischen Beanspruchungen nach festgelegten Lastwechselzahlen unter Unter- bzw. Oberlast registriert wurden.

Zur Durchführung der Versuche wurden alle Prüfkörper in einem eigens konstruierten Prüfrahm eingebaut und das freie Spanngliedende über eine gelenkige Muffe mit dem Zugkolben des Prüfzylinders verbunden, so daß stets eine zentrische Krafteinleitung gewährleistet war.

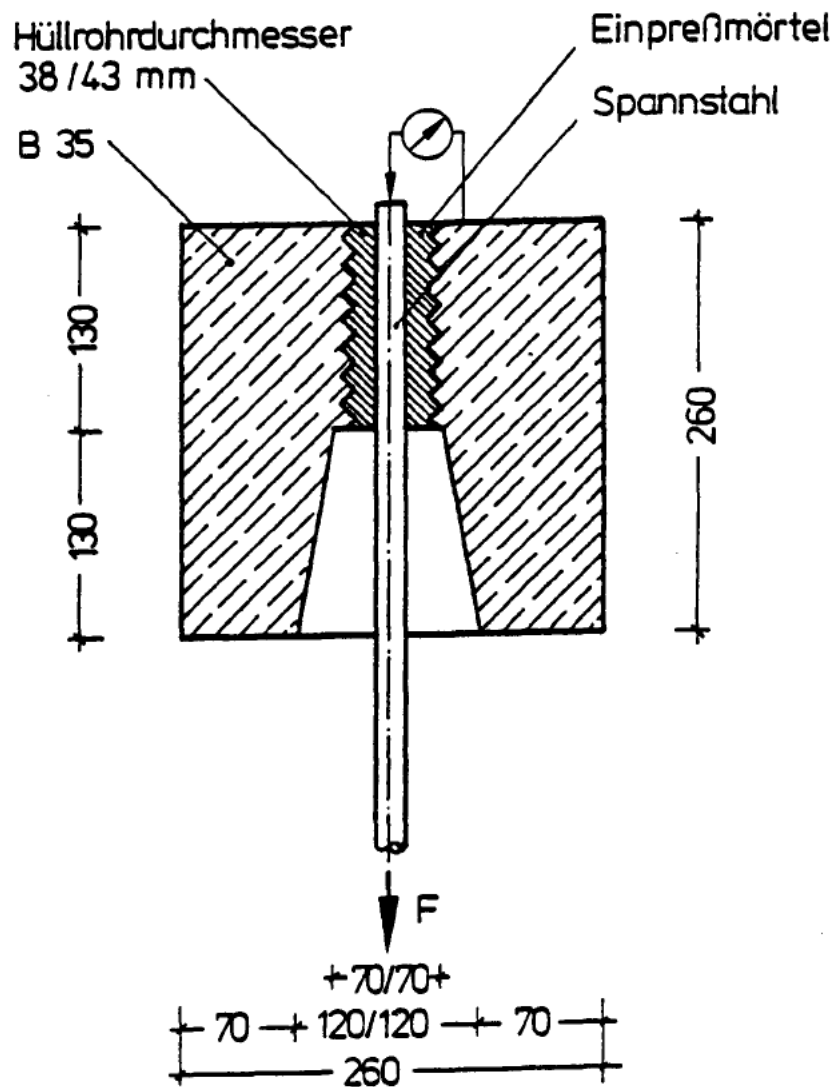


Bild 1: Ausbildung der Versuchskörper und Anordnung der Meßelemente zur Bestimmung der Relativverschiebungen

3.4 Versuchsdurchführung

Nach Einbau der Prüfkörper in die Versuchseinrichtung wurden die Schwellbeanspruchungen bzw. die statischen Beanspruchungen aufgebracht. Bei den Schwellbeanspruchungen wurden die Verschiebungen nach 1, 10, 100, 1000, 10 000, 100 000 sowie alle weiteren 100 000 Lastwechsel unter Unter- bzw. Oberlast gemessen; bei den statischen Versuchen erfolgten diese Verschiebungsmessungen kontinuierlich.

Die Belastungsgeschwindigkeit wurde in Anlehnung an die in der Praxis zu erwartenden Belastungsgeschwindigkeiten gewählt.

Die Versuche galten als beendet, wenn entweder der Stahl aus dem Prüfkörper herausgezogen war oder wenn nach ca. 1 000 000 Lastwechsel aufgrund der gemessenen Verschiebungen davon ausgegangen werden konnte, daß kein Verbundversagen mehr eintreten würde.

Nach Abschluß eines Versuches wurde der Spannstahl einschließlich des zugehörigen Hüllrohres sorgfältig aus den Prüfkörpern ausgebaut und das Hüllrohr entfernt. Nachfolgend wurde schließlich der Einpreßmörtel vom Spannstahl abgehoben und nach inneren Rißbildungen untersucht.

Parallel zu diesen Versuchen wurden die Begleitkörper zur Bestimmung der Festigkeit des Injektionsmörtels geprüft.

Alle Ausziehversuche wurden 7 Tage nach Vergießen der Hüllrohre durchgeführt; die zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Druckfestigkeiten des Einpreßmörtels sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Versuch Nr.	Einpreßmörtelfestigkeit β_c nach 7 Tagen in N/mm ²	Verwendeter Spannstahl
1 - 3 4 - 6 7 - 9 10 - 12	43 56 53 44	∅ 26,5 mm Gewindestahl
13 - 14 15 - 17 18 - 20 21 - 22 23 - 24	43 37 46 57 42	∅ 26 mm glatter Stahl
25 - 27 28 - 30 31 - 33 34 - 37 38 - 39	50 47 44 42 41	Litzen

Tabelle 1: Druckfestigkeit des Einpreßmörtels

4 Auswertung und Beurteilung der Versuchsergebnisse

4.1 Allgemeines

In den Anlagen 2 bis 29 sind die aus den gemessenen Last-Verformungsbeziehungen errechneten normierten Verbundspannungs-Verschiebungsbeziehungen der untersuchten Spannglieder dargestellt. Da alle Versuchskörper immer in der Verbundfuge Spannstahl/Einpreßmörtel und nie in der Verbundfuge Hüllrohr/Beton versagten, konnte die Ermittlung der Verbundspannung unter Annahme einer über die Verbundlänge konstanten Spannungsverteilung zu

$$\tau_v = F / (U_v \cdot l_v) \quad (1)$$

mit

F = Zugkraft

U_v = Verbundumfang

l_v = Verbundlänge

erfolgen. U_v wurde in Anlehnung an die Untersuchungen von Trost et al. /13/ bei glatten und profilierten Einzelstäben mit

$$U_v = \pi \cdot d_v \quad (2)$$

und bei Litzen mit

$$U_v = 1,6 \cdot \pi \cdot \sqrt{A_v} \quad (3)$$

ermittelt, wobei die Richtigkeit von Gleichung (3) durch Nachmessen der tatsächlichen Verbundfläche bestätigt werden konnte.

Um einen direkten Vergleich der Ergebnisse untereinander zu ermöglichen, wurde die auch in /12, 14/ aufgezeigten und von Rehm /9/ nachgewiesene Proportionalität zwischen τ_v und β_c bei gerippten Stäben und Litzen bzw. τ_v und $\sqrt{\beta_c}$ bei glatten Stäben genutzt und die bei den Ausziehprüfkörpern mit gerippten Stäben bzw. Litzen gemessenen Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehungen nach vorstehenden Ansätzen auf die Mörtelfestigkeit bezogen.

Hierbei wurden die in Tabelle 1 aufgeführten und bei jeder Prüfserie im Zuge der Prüfung von Begleitkörpern ermittelten Festigkeiten der Injektionsmörtel verwendet.

In den Anlagen 2, 11 und 19, in welchen die in den statistischen Pull-Out Begleitversuchen gemessenen und auf β_c bzw. $\sqrt{\beta_c}$ bezogenen Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehungen dargestellt sind, wurden zusätzlich die entsprechenden von Weber /14/ durch Auswertung der von Trost et

al. /13/ gemessenen Zusammenhänge ermittelten rechnerischen Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehungen vergleichend eingetragen.

Die im Rahmen dieser Untersuchungen gemessenen Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehungen bestätigen die schon bei früheren Untersuchungen gewonnene Erkenntnis, daß diese Verschiebungsbeziehungen trotz identisch erscheinender Randbedingungen dennoch stark streuen können, was insbesondere auch in einer unterschiedlich rauhen Oberfläche der verwendeten Spannglieder begründet sein dürfte.

Die in /14/ abgeleiteten theoretischen Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehungen für Spannglieder mit nachträglichem Verbund, die, wie bereits erwähnt, vergleichend in die vorgenannten Diagramme eingefügt sind, zeigen gute Übereinstimmung bei Litzen und gerippten Stählen.

Die bei glatten Einzelstäben gemessenen Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehungen liegen dagegen sehr viel günstiger als die von /14/ angegebenen Zusammenhänge erwarten lassen.

Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, daß in /14/ die theoretischen Zusammenhänge für glatte Einzelstäbe und glatte Drähte gemeinsam entwickelt wurden, wobei die glatten Drähte in den Versuchen ein deutlich ungünstigeres Verbundverhalten zeigten, und die theoretische Ableitung der zugeordneten Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung auf diesen Meßwerten aufbaute.

Insgesamt kann aber festgestellt werden, daß die in /14/ aufgezeigten theoretischen Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehungen in der Lage sind, auch die im Rahmen dieser Untersuchungen ermittelten Zusammenhänge für statische Beanspruchungen befriedigend zu beschreiben.

4.2 Verbundverhalten dauerschwellbeanspruchter gerippter Spannstähle

In den Anlagen 3 bis 10 sind die Ergebnisse der Dauerschwellversuche mit gerippten Spannstählen ($d_v = 26,5 \text{ mm}$) dargestellt.

Bei dieser Versuchsreihe wurden Schwingbreiten $\Delta \sigma$ von 50 N/mm^2 und 100 N/mm^2 vorgegeben und die mittlere Spannstahlspannung zu 50 N/mm^2 , 100 N/mm^2 bzw. 150 N/mm^2 gewählt; damit betrugen die Oberspannungen aus der Dauerschwellbeanspruchung zwischen 75 N/mm^2 und 250 N/mm^2 .

Mit der Vorgabe unterschiedlich hoher mittlerer Stahlspannungen sollte der in der Praxis ständig vorkommende Fall simuliert werden, daß sich beispielsweise infolge von Zwangbeanspruchungen Risse bzw. Fugen öffnen und sich somit abhängig vom Spannstahlbewehrungsgrad erhöhte Stahlspannungen im Fugen- bzw. Rißbereich ergeben, die hier zu signifikanten Verbundbeanspruchung führen.

Diesem Spannungszustand überlagert sich schließlich der Beanspruchungszustand aus wechselnden Verkehrslasten, der zu einer Schwellbeanspruchung des Verbundes führt und somit den durch die Riß- bzw. Fugenöffnung vorgegebenen Spannungs- bzw. Verbundspannungszustand abhängig von der Größe der einwirkenden Wechselbeanspruchungen verändert.

Somit muß davon ausgegangen werden, daß für die Beschreibung des Einflusses der Dauerschwellbeanspruchung auf das Verbundverhalten von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund nicht nur die Schwingbreite eine Rolle spielt sondern im ähnlichen Maße auch die mittlere Stahlspannung mitbestimmend ist.

So zeigten denn auch die durchgeführten Versuche, daß eine Schwingbreite von 50 bzw. 100 N/mm^2 keine nennenswerten Verbundstörungen bewirkt, wenn die zugeordnete mittlere Stahlspannung bei 50 N/mm^2 liegt (Versuche 2, 3).

Wird dagegen die mittlere Stahlspannung auf 100 N/mm^2 erhöht, was im praktischen Fall bei sonst gleichen Verhält-

nissen einem reduzierten Spannstahlquerschnitt gleichkäme, führt bereits eine Schwingbreite von 50 N/mm^2 zu beträchtlichen Zunahmen der zugeordneten Verschiebungen aber noch nicht zu einem Verbundversagen (Versuche 5, 11).

Wurde hingegen bei gleichbleibender mittlerer Stahlspannung von 100 N/mm^2 die Schwingbreite von 50 auf 100 N/mm^2 erhöht, trat Verbundversagen während der Dauerschwellbeanspruchung ein. (Versuch 6,12)

In den Versuchen 8 und 9 wurde die mittlere Stahlspannung auf 150 N/mm^2 erhöht und ebenfalls eine Schwingbreite von 50 bzw. 100 N/mm^2 vorgegeben.

Versuch Nr. 8 zeigte bei einer Schwingbreite von 50 N/mm^2 zwar eine Zunahme der Verbundverschiebung, doch trat kein Verbundversagen infolge der Schwellbeanspruchung ein, obwohl die gewählte Oberspannung gleich derjenigen der Versuche Nr. 6 und 12 war, bei denen bei einer mittleren Stahlspannung von 100 N/mm^2 eine Schwingbreite von 100 N/mm^2 vorgegeben wurde und zusätzlich noch die auf die Einpreßmörtelgüte bezogene normierte Verbundspannung niedriger war als bei Versuch Nr. 8.

Bei Versuch Nr. 9 trat demgegenüber während der Dauerschwellbeanspruchung ein Verbundversagen auf, was sich bereits während der Schwellbeanspruchung durch die kontinuierliche Zunahme der Verbundverschiebungen andeutete.

Zusammenfassend kann aus den Versuchen mit gerippten Einzelspannstäben mit nachträglichem Verbund im Hinblick auf den Einfluß einer Schwellbeanspruchung auf den Verbundmechanismus festgestellt werden, daß

- für die Beurteilung des Einflusses einer Schwellbeanspruchung nicht nur die Größe dieser Schwellbeanspruchung sondern auch die zugeordnete mittlere Stahlspannung d. h. die Vorbeanspruchung des Verbundes mit berücksichtigt werden muß;
- bei gleicher mittlerer Stahlspannung die Verformungen mit größer werdender Schwingbreite zunehmen;

- der Haftverbund auf das Verbundverhalten infolge Schwellbeanspruchung keine wesentliche Bedeutung hat;
- ein systematischer Einfluß der Dauerschwellbeanspruchung auf die Ausziehenkraft nicht festgestellt werden konnte.

Bestimmend für das Verbundversagen von gerippten Spannstählen mit nachträglichem Verbund war bei allen untersuchten Fällen die Scherfestigkeit des Einpreßmörtels d.h. die Festigkeit der Mörtelkonsolen zwischen den einzelnen Rippen der Gewindestäbe.

Für die praktische Bemessung kann aus diesen Versuchen abgeleitet werden, daß zur Gewährleistung einer auch unter Dauerschwellbeanspruchung nicht über das zulässige Maß hinausgehenden Fugenöffnung und zur Sicherung eines ausreichenden Abstandes zwischen tatsächlicher und maximal aufnehmbarer Verbundbeanspruchung eine Schwingbreite infolge wechselnder Verkehrslasten von 100 N/mm^2 nicht überschritten werden sollte, wobei zusätzlich der maximale Stahlspannungszuwachs im Fugen- bzw. Rißquerschnitt unter Rißlast und wechselnder Verkehrslast 125 N/mm^2 nicht übersteigen sollte. Dabei wird die Verwendung eines Einpreßmörtel üblicher Güte vorausgesetzt.

Diese Grenzwerte werden bei den derzeit geltenden Bestimmungen in DIN 4227 Teil 3 /1/ eingehalten; dies wird in der Weise erreicht daß, nachzuweisen ist, daß unter einer vorgegebenen Beanspruchungskombination die Fugenspaltbreite in Höhe der zugrandnächsten Spanngliedlage nicht mehr als 0,15 mm beträgt.

Dieser Nachweis in /1/ baut auf den Ansätzen von /14/ auf. Danach ergibt sich zulässige maximale Spannstahlspannungsdifferenz $\Delta\sigma_v$ bei einer maximalen Fugenbreite von 0,15 mm zu

$$\Delta\sigma_v = \Delta_x^{(1+c) \cdot 0,5} \cdot U_v \cdot \beta_c \cdot b / (A_v \cdot \sqrt{a_1 + 0,5(1+c)}) \quad (4)$$

Hierin bedeuten:

$$a_1 = U_v \cdot b \cdot \beta_c / (A_v \cdot E) \quad (5)$$

Δ_x = Rißbreitenanteil aus Verbundbeanspruchung $\leq 0,034$ mm

b, c = Verbundbeiwerte

β_c = Serienfestigkeit des Einpreßmörtels

U_v = effektiver Verbundumfang der Spannstähle

A_v = Spannstahlquerschnitt

E = Elastizitätsmodul des Spannstahles

Die Auswertung von Gl. (4) unter Verwendung der charakteristischen Verbundbeiwerte für gerippte Spannstähle von

$$b = 0,63$$

$$c = 0,62 \quad (6)$$

und Berücksichtigung der maximal zul. Verbundverschiebung von $\Delta_x = 0,034$ mm führt zu den in Tabelle 2 aufgeführten maximal zul. Stahlspannungsdifferenzen $\Delta\sigma_v$, die unabhängig von dem Spannstahldurchmesser in jedem Fall unterhalb der zul. Spannstahlspannungsdifferenz liegen, die sich aus der Begrenzung des Einflusses einwirkender Dauerschwellbeanspruchungen ergab:

	Spannstahldurchmesser		
	16mm	26,5mm	32 mm
zul. $\Delta\sigma_v$ gem. Gl. (4)	82	64	58
zul. $\Delta\sigma_v$ zur Begrenzung des Einflusses aus Dauerschwellbeanspruchung	100	100	100

Tabelle 2: Zul. Spannstahlspannungsdifferenzen gerippter Spannstähle zur Begrenzung der Fugenspaltbreiten und zur Eingrenzung des Einflusses aus Dauerschwellbeanspruchung

4.3 Verbundverhalten dauerschwellbeanspruchter glatter Spannstähle

Die an glatten Spannstählen unter Dauerschwellbeanspruchung ermittelten Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehungen sind in den Anlagen 12 bis 18 dargestellt (Versuche 14, 16, 17, 19, 20, 22 und 24).

Bei diesen Versuchen wurden Schwingbreiten von 25 N/mm² und 50 N/mm² vorgegeben und mittlere Stahlspannungen von ca. 15 N/mm², 33 N/mm² und 47 N/mm² gewählt.

Das Aufbringen höherer Schwingbreiten gelang bei diesen Versuchskörpern nicht, da wegen des ausschließlichen Wirkens des Haftverbundes höhere Beanspruchungen nicht aufgenommen werden konnten. Diese Versuche zeigten, daß erwartungsgemäß glatte Spannstähle ein ungünstiges Verbundverhalten besitzen.

Die Verbundprüfkörper versagten bei den dynamischen Versuchen während der Dauerschwellbeanspruchung dann, wenn die aus der aufgebrachten Oberlast resultierende Verbundspannung näherungsweise die Haftverbundfestigkeit erreichte. Dieses Ergebnis ist unabhängig von der Größe der Schwingbreite und unabhängig von der Höhe der mittleren Stahlspannung sondern lediglich abhängig von der größten überhaupt aufgebrachten Verbundbeanspruchung. Insofern zeigt sich in diesen Versuchen die schon in /3/ enthaltene Erkenntnis, wonach das Haftverbund-Versagen unabhängig von der Dauerschwellbeanspruchung und nur von der größten aufgebrachten Gesamtbeanspruchung abhängig ist.

Sofern während der Dauerschwellbeanspruchung kein Verbundversagen auftrat, war die Verformungszunahme infolge der Dauerschwellbeanspruchung verhältnismäßig gering (Versuche 14, 17, 20). Dies ist darauf zurückzuführen, daß es sich bei dem Haftverbund um einen verformungsarmen Verbund handelt, wo größere Verschiebungen bereits den Beginn der Verbundzerstörung anzeigen.

Da, wie bereits erwähnt das Verbundverhalten von glatten Spannstäben mit nachträglichem Verbund nur von der Größe der überhaupt erreichten Belastung abhängig ist, gilt es,

die Oberlast zur Vermeidung eines Verbundversagens infolge Dauerschwellbeanspruchung wirkungsvoll zu begrenzen.

Deshalb sollte beispielsweise beim Nachweis der Rißbreitenbegrenzung bei Spannbetonbauteilen in Segmentbauart die zulässige Verbundspannung bei Verwendung glatter Spanndrähte begrenzt werden.

Aus der Auswertung der im Rahmen dieser Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse ergibt sich ein oberer zulässiger Grenzwert der Verbundspannung von

$$\tau_v / \sqrt{f_{ct}} = \sim 0,25. \quad (7)$$

Dem Nachweis der Rißbreitenbegrenzung in /1/ liegt bei einer zulässigen Fugenspaltbreite von 0,15 mm ein Maximalwert $\tau_v / \sqrt{f_{ct}}$ von $0,16 < 0,25$ zugrunde.

Dieser Wert liegt deutlich unter dem zur Begrenzung des Einflusses von Dauerschwellbeanspruchungen zulässigen Wert von 0,25, so daß auch bei glatten Spannstählen unter Zugrundelegung einer zul. Fugenspaltbreite von 0,15 mm bei Einhaltung der Regelungen in /1/ die Bedingungen zur Begrenzung der Auswirkungen von Dauerschwellbeanspruchungen stets eingehalten werden.

4.4 Verbundverhalten dauerschwellbeanspruchter Litzen- spannglieder

In den Anlagen 20 bis 29 sind die unter Verwendung von Spannstahllitzen infolge dynamischer Lastbeanspruchung gewonnenen Verbundspannungs-Verschiebungsbeziehungen bezogen auf die Einpreßmörtelgüte dargestellt.

Bei diesen Versuchen wurde eine mittlere Stahlspannung von 50 N/mm², 75 N/mm² und 100 N/mm² gewählt; die Schwingbreiten betrugen ca. 50, 65, 75 bzw. 100 N/mm². Die Auswertung dieser Versuche zeigt, daß ähnlich wie bei den glatten Spannstäben immer dann ein Verbundversagen infolge Dauerschwellbeanspruchung zu erwarten ist, sobald die maximale Verbundspannung infolge der Lastwechselbeanspru-

chung die Größe der Haftverbundfestigkeit erreicht. Das beginnende Verbundversagen infolge Dauerschwellbeanspruchung kündigte sich bei den Versuchen bereits frühzeitig durch eine starke Zunahme der Verschiebungen an. Sofern unter Dauerschwellbeanspruchung kein Verbundversagen auftrat, war die Verformungszunahme infolge der Beanspruchung immer kleiner als 0,05 mm. Dagegen überschritten die Verschiebungen der Verbundprüfkörper, bei denen infolge Dauerschwellbeanspruchungen ein Verbundversagen eintrat, bereits frühzeitig diesen Grenzwert von 0,05 mm.

Dieser Grenzwert trat bei einem Verhältnis τ_v/β_c von 0,04 auf, so daß als für die Praxis nutzbares Ergebnis aus diesen Versuchen abgeleitet werden kann, daß infolge des Einwirkens einer Dauerschwellbeanspruchung und beginnender Fugenöffnung die auftretenden maximalen Verbundspannungen bezogen auf die Einpreßmörtelgüte einen Wert von

$$\tau_v/\beta_c = 0,04 \quad (8)$$

nicht überschreiten sollten. Diesem oberen Grenzwert entsprechen unter Auswertung von Gl. (4) unter Zugrundelegung der maßgebenden Verbundspannungsbeiwerte b, c gemäß /14/ zugeordnete Stahlspannungsdifferenzen von etwa 85 N/mm². Dieser Wert wird bei üblichen Spannstahlbewehrungsgraden und üblichen Vorspanngraden beim Nachweis der Rißbreitenbeschränkung bzw. Fugenspaltbreitenbegrenzung in aller Regel nicht erreicht, was bedeutet, daß sich für die konstruktive Ausbildung derartiger Bauwerke aus dieser Randbedingung keine wesentlichen Einschränkungen ergeben dürften.

Es muß jedoch beachtet werden, daß die entsprechenden Regelungen in /1/ einen Maximalwert τ_v/β_c von

$$\tau_v/\beta_c = 0,06 \geq 0,04 \quad (9)$$

zulassen, woraus sich bei Litzenspanngliedern zur Begrenzung der Auswirkungen von Dauerschwellbeanspruchungen auf das Rißverhalten segmentärer Spannbetonkonstruktionen in Grenzfällen Einschränkungen der entsprechenden Formulierungen in /1/ ergeben.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens sollte der Einfluß praxisüblicher Dauerschwellbeanspruchungen auf das Verbundverhalten handelsüblicher Spannstähle bei nachträglichem Verbund untersucht werden. Um möglichst alle gängigen Spannstahltypen zu erfassen, wurden die Untersuchungen an Gewindestäben (\emptyset 26,5 mm), glatten Stäben (\emptyset 26,0 mm) sowie Spannstahllitzen (7 \emptyset 5,2 mm) durchgeführt. Bei den Versuchen wurde die Schwingbreite der Schwellbeanspruchung zwischen 25 N/mm² und 100 N/mm² variiert, wobei ergänzend auch die mittlere Stahlspannung zwischen 25 und 150 N/mm² verändert wurde.

Mit dieser Kombination zwischen Spannstahlspannungsamplitude und mittlerem Spannstahlspannungszuwachs sollte der in der Praxis wiederholt auftretende Fall simuliert werden, daß eine Grundverbundbeanspruchung infolge einer Riß- bzw. Fugenöffnung eintritt und eine nachfolgende Verkehrslast- Wechselbeanspruchung eine zusätzliche Verbundwechselbeanspruchung bewirkt.

Der Anschluß an bereits vorliegende Untersuchungen über das Verbundverhalten von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund unter statischer Lasteinwirkung wurde durch Prüfung der untersuchten Spannstähle im Standard Pull-Out Versuch unter Verwendung von Injektionsmörtel gemäß DIN 4227 Teil 5 hergestellt.

Die bei diesen Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse zeigen in Übereinstimmung mit bereits vorliegenden fremden Versuchsergebnissen, daß die Auswirkung einer Dauerschwellbeanspruchung auf das Verbundverhalten abhängig vom verwendeten Spannstahltyp ist und deutlich unterschiedlich

abläuft:

So zeigen gerippte Spannstäbe das günstigste Verhalten infolge einer pulsierenden Lasteinwirkung; der Verbundmechanismus hängt nicht so sehr vom Haftverbund sondern vielmehr vom Scherverbund und damit von der Scherfestigkeit der Mörtelkonsolen zwischen den Spannstahlprofilierungen ab.

Diese Erkenntnis stimmt mit dem Ergebnis von Rehm u. Eli-gehausen /10/ überein, in dem gleiches für gerippte Betonstähle unter dynamischer Last festgestellt wurde.

Bei Litzenspanngliedern und glatten Spanngliedern hängt das Verbundverhalten dagegen nicht von der Größe der mittleren Stahlspannung und der Größe der Schwellbeanspruchung sondern ausschließlich von der größten überhaupt erreichten Stahlspannung und der daraus resultierenden größten Verbundbeanspruchung ab, da für das Verbundverhalten bei glatten Stäben ausschließlich, bei Litzenspanngliedern überwiegend der Haftverbund maßgebend ist, ein Ergebnis, das auch aus den Untersuchungen von Edwards und Yannopoulos /3/ hervorgeht.

Als für die Praxis wichtigstes Ergebnis kann aus diesen Untersuchungen abgeleitet werden, daß es zur Sicherung einer ausreichenden Gebrauchstüchtigkeit von teilweise vorgespannten Bauteilen bzw. von Segmentkonstruktionen, wo die Verbundwirkung der Spannglieder mit nachträglichem Verbund zur Begrenzung der Riß- bzw. der Fugenspaltbreiten planmäßig hinzugezogen wird, notwendig ist, nicht nur den Nachweis dieser Fugenspaltbreitenbegrenzung unter der vorgegebenen Lastkombination zu erbringen sondern darüberhinaus aufzuzeigen, daß die maximalen Verbundspannungen zulässige Werte nicht überschreiten.

Bei gerippten Spanngliedern sollte durch den Nachweis erfolgen, daß die zulässige Schwingbreite infolge wechselnder Lastbeanspruchung 100 N/mm^2 nicht überschreitet.

Bei glatten Spannstäben sollte die maximale Verbundspannung, bezogen auf die Wurzel aus der Einpreßmörtelgüte,

einen Wert von 0,25 nicht überschreiten.

Bei Verwendung von Litzenspanngliedern sollte das Verhältnis τ_v zu β_c nicht größer als 0,04 werden.

Durchgeführte Vergleichsbetrachtungen mit den Nachweisverfahren zur Begrenzung der Fugenspaltbreite segmentärer Spannbetonkonstruktionen /1/ zeigen, daß mit den Formulierungen in /1/ die vorab für gerippte und glatte Spannglieder aufgeführten Grenzbedingungen stets eingehalten sind, so daß keine ergänzenden Nachweise erforderlich sind.

Bei Litzenspanngliedern gestatten die Regelungen in /1/ einen Maximalwert von τ_v/β_c von 0,06, was bedeutet, daß in Einzelfällen die Grenzbedingung gemäß Gl. (8) bei der Begrenzung der Fugenspaltbreiten maßgebend werden könnte.

Um die Übertragbarkeit der im Rahmen dieser Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse auf Bauwerke zu belegen, sollten im Rahmen vertiefter Studien Bauteilversuche durchgeführt werden, an denen beispielhaft die Auswirkung einer Dauerschwellbeanspruchung auf das Verbund- und Rißverhalten einer Segmentkonstruktion nachgewiesen werden kann; mit diesen Untersuchungen wurde zwischenzeitlich im Rahmen des Forschungsvorhabens "Einfluß von Größe und Dauer praxisüblicher Schwellbeanspruchungen auf die Gebrauchsfähigkeit segmentärer und teilweise vorgespannter Betonbauteile" begonnen. Bei dieser Untersuchung kommen jedoch nur gerippte und glatte Spannglieder zum Einsatz. Eine Ausweitung des Umfangs dieses Forschungsvorhabens auf Bauteile mit Litzenspanngliedern erscheint dringend geboten um insbesondere die Grenzbedingung $\tau_v/\beta_c \leq 0,04$ gemäß Gl. (8) zu überprüfen.

6 Literaturverzeichnis

- / 1/ DIN 4227 Teil 3.: Spannbeton, Bauteile in Segmentbauart; Bemessung und Ausführung der Fugen, Vornorm, Dezember 1983.

- / 2/ DIN 4227 Teil 5: Spannbeton; Einpressen von Zementmörtel in Spannkanäle, 1983.

- / 3/ Edwards, A. D.; Yannopoulos, P. J.: Local bond-stress-slip-relationships under repeated loading. Magazine of Concrete Research, Vol. 30, Nr. 103, Juni 1978.

- / 4/ Kordina, K.; Weber V.: Rißbildung von Segmentbauteilen in Abhängigkeit von Querschnittsausbildung und Spannstahlverbundeigenschaften. Heft 350 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, 1983.

- / 5/ Kordina, K.: Bauteile in Segmentbauart; Bemessung und Ausführung der Fugen. Betonwerk und Fertigteiltechnik, Heft 6, 1984 S. 375 - 387.

- / 6/ Kupfer, H.: Die Beanspruchung des Verbundes zwischen Spannglied und Beton. Heft 159 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, 1964.

- / 7/ Leonhardt, F.: Rissebeschränkung. Beton und Stahlbetonbau, Heft 1, 1976 S.14-20

- / 8/ Martin, H.: Zusammenhang zwischen Oberflächenbeschaffenheit, Verbund und Sprengwirkung von Bewehrungsstählen unter Kurzzeitbelastung. Heft 228 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, 1973.

- / 9/ Rehm, G.: Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton. Heft 138 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, 1961.

- /10/ Rehm, G.; Ehligehausen, R.: Bond of ribbed bars under high cycle repeated loads. ACI Journal, Feb. 1979, S. 297 - 309.

- /11/ Teutsch, M.; Weber, V.: Schubtragverhalten von Spannbetonbauteilen in Segmentbauart. Betonwerk und Fertigteiltechnik, Heft 6, 1984 S. 402 - 411.

- /12/ Thormählen, U.: Zum Einfluß von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund auf Rißbildung und Rißbreitenbeschränkung bei teilweise vorgespannten Konstruktionen (Dissertation), RWTH Aachen, 1978.

- /13/ Trost, H.; Cordes, H.; Thormählen, U.; Hagen, H.: Teilweise Vorspannung, Verbundfestigkeit von Spanngliedern und ihre Bedeutung für Rißbildung und Rißbreitenbeschränkung. Heft 310 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, 1980.

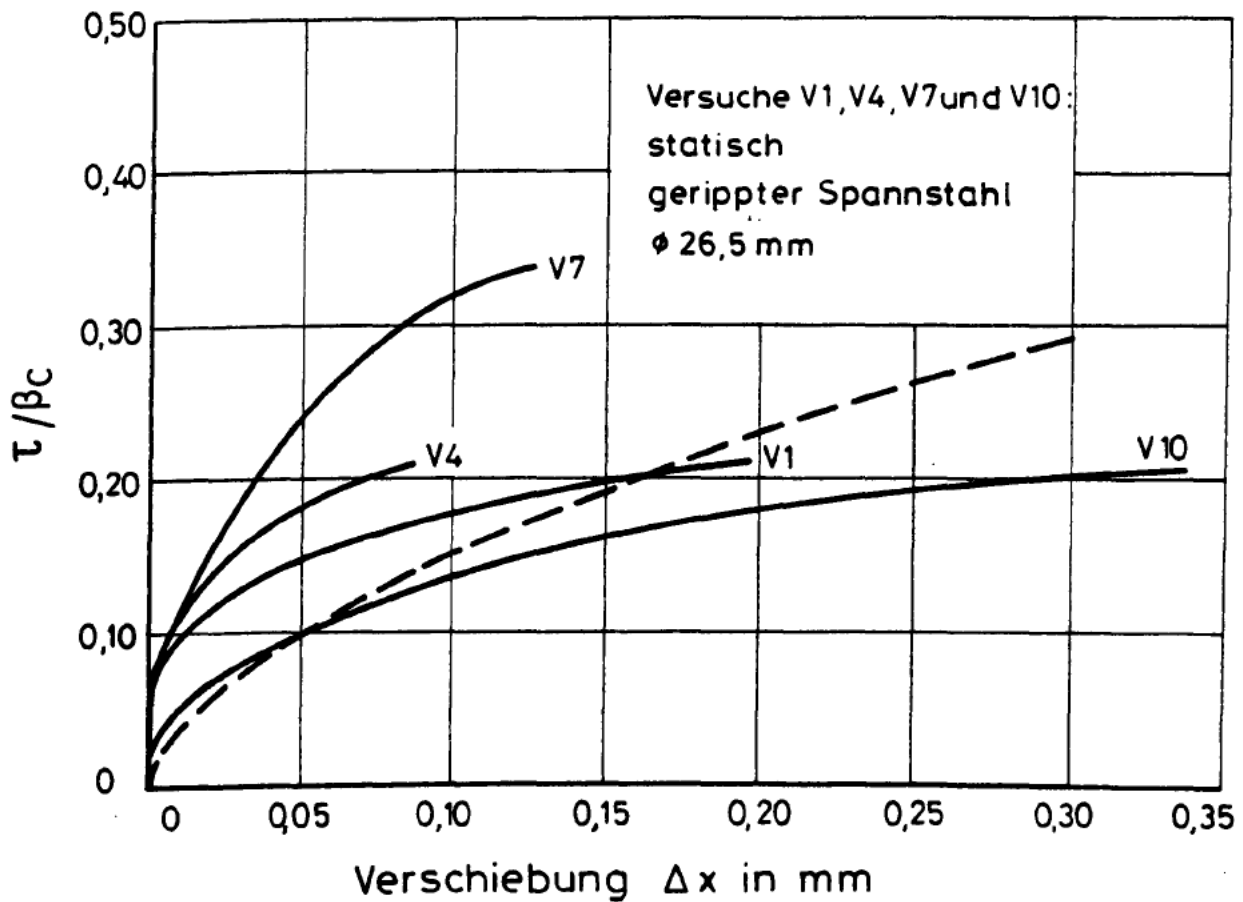
- /14/ Weber, V.: Untersuchung des Riß und Verformungsverhaltens segmentärer Spannbetonbauteile. Heft 53, der Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig (Dissertation) 1982.

- /15/ Weber, V.: "Begrenzung der Fugenspaltbreiten bei Spannbetonbauteilen in Segmentbauart". Erscheint demnächst in Betonwerk + Fertigteiltechnik.

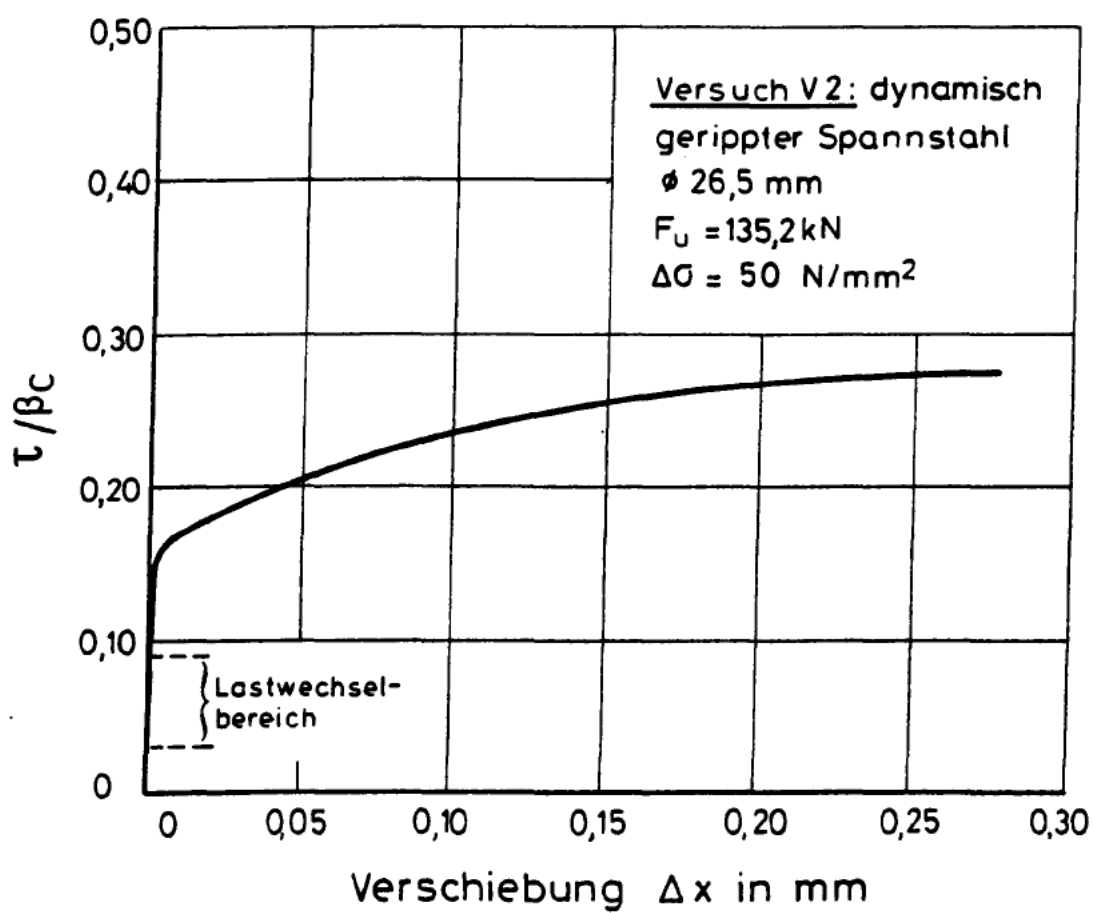
7 Anlagen

Versuch Nr.	β_c N/mm ²	σ_u	σ_o in N/mm ²	$\Delta\sigma$	σ_m	τ_u	τ_o in N/mm ²	$\Delta\tau$	F_u kN	Last- wechsel
1	43	—	—	—	—	—	—	—	107,9	—
2	43	26	76	50	51	1,3	3,8	2,5	135,2	1848770
3	43	4	102	98	51	0,2	5,1	4,9	56	1980
4	56	—	—	—	—	—	—	—	138,2	—
5	56	73	123	50	98	3,6	6,2	2,6	89,6	1462050
6	56	52	152	100	102	2,5	7,6	5,1	84	788800
7	53	—	—	—	—	—	—	—	138	—
8	53	128	178	50	153	6,4	8,9	2,5	149	1280150
9	53	103	203	100	153	5,1	10,2	5,1	112	510840
10	44	—	—	—	—	—	—	—	126,85	—
11	44	77	127	50	102	3,8	6,4	2,6	127,15	945740
12	44	52	152	100	102	2,5	7,6	5,1	84	554420
13	43	—	—	—	—	—	—	—	30	—
14	43	3	26	23	14,5	0,2	1,3	1,1	41,3	940110
15	37	—	—	—	—	—	—	—	52,5	—
16	37	23	72	49	47,5	1,1	3,6	2,5	38	10
17	37	20	45	25	32,5	1,0	2,7	1,3	55,5	1531810
18	46	—	—	—	—	—	—	—	41,65	—
19	46	6	53	47	29,5	0,3	2,6	2,3	15	1
20	46	25	58	23	41,5	1,8	2,9	1,1	47,7	1655020
21	57	—	—	—	—	—	—	—	41	—
22	57	26	75	49	50,5	1,3	3,8	2,5	40	69
23	42	—	—	—	—	—	—	—	56,5	—
24	42	6	55	49	30,5	0,3	2,7	2,4	29	250
25	50	—	—	—	—	—	—	—	16	—
26	50	26	77	51	51,5	0,5	1,4	0,9	23,65	1099370
27	50	51	102	51	76,5	0,9	1,8	0,9	20,35	1511970
28	47	—	—	—	—	—	—	—	34,1	—
29	47	26	128	102	77	0,6	2,3	1,7	17,5	293650
30	47	77	128	51	102,5	1,4	2,3	0,9	14,45	—
31	44	—	—	—	—	—	—	—	30,85	—
32	44	77	128	51	102,5	1,4	2,3	0,9	16,5	1
33	44	29	102	73	65,5	0,5	1,8	1,3	14,0	—
34	42	—	—	—	—	—	—	—	20,75	—
35	42	29	102	73	65,5	0,5	1,8	1,3	14,0	—
36	42	26	77	51	51,5	0,5	1,4	0,9	23,0	987650
37	42	—	—	—	—	—	—	—	15,0	—
38	41	15	88	73	51,5	0,3	1,6	1,3	12,0	13340
39	41	15	88	73	51,5	0,3	1,6	1,3	12,0	2060

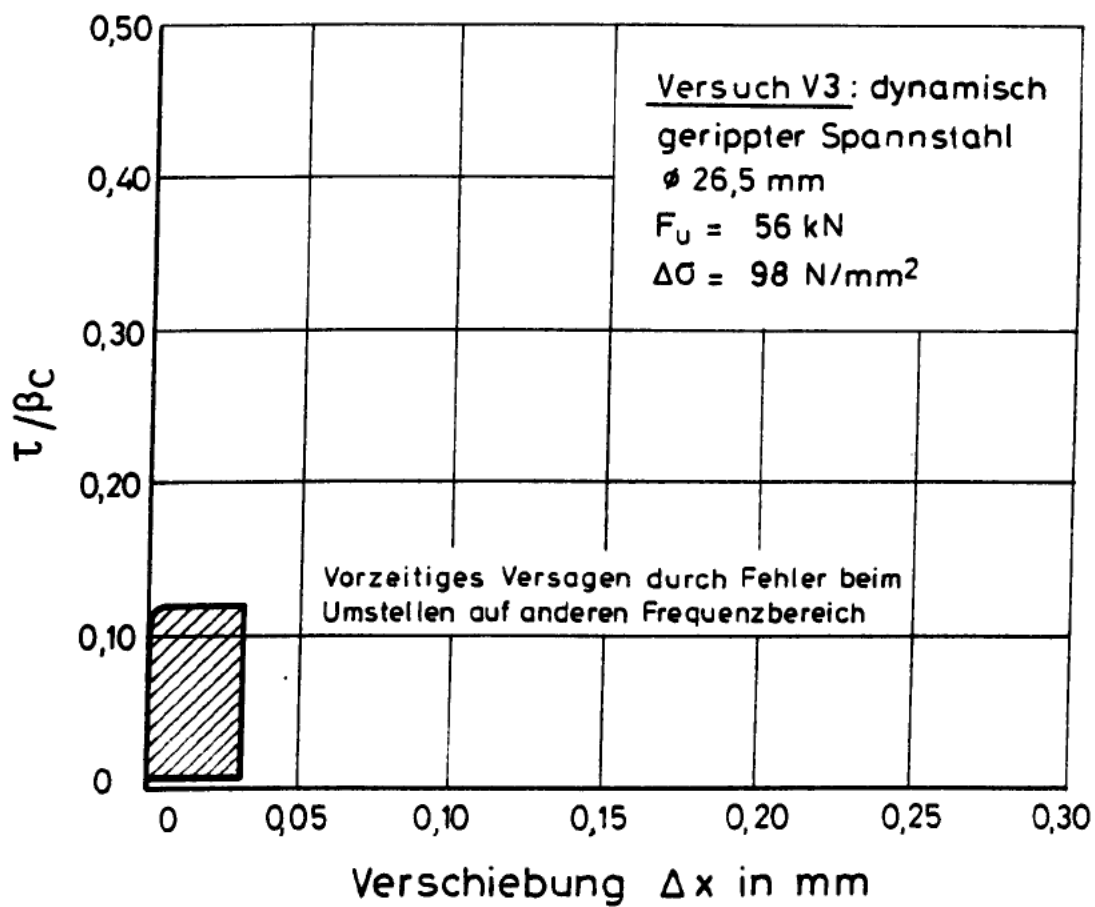
Anlage 1: Charakteristische Daten der durchgeführten Versuche



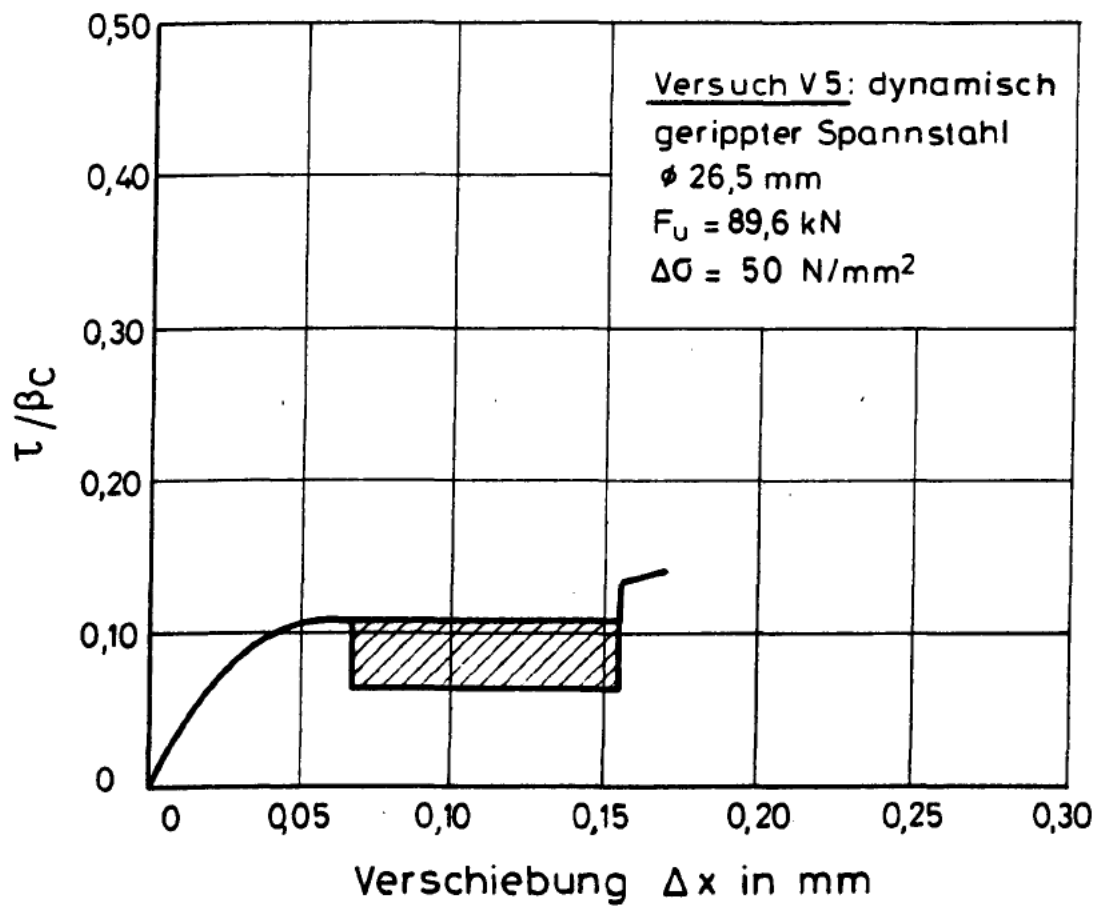
Anlage 2: Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehungen der statischen Ausziehversuche im Vergleich zu den Ergebnissen von /12/



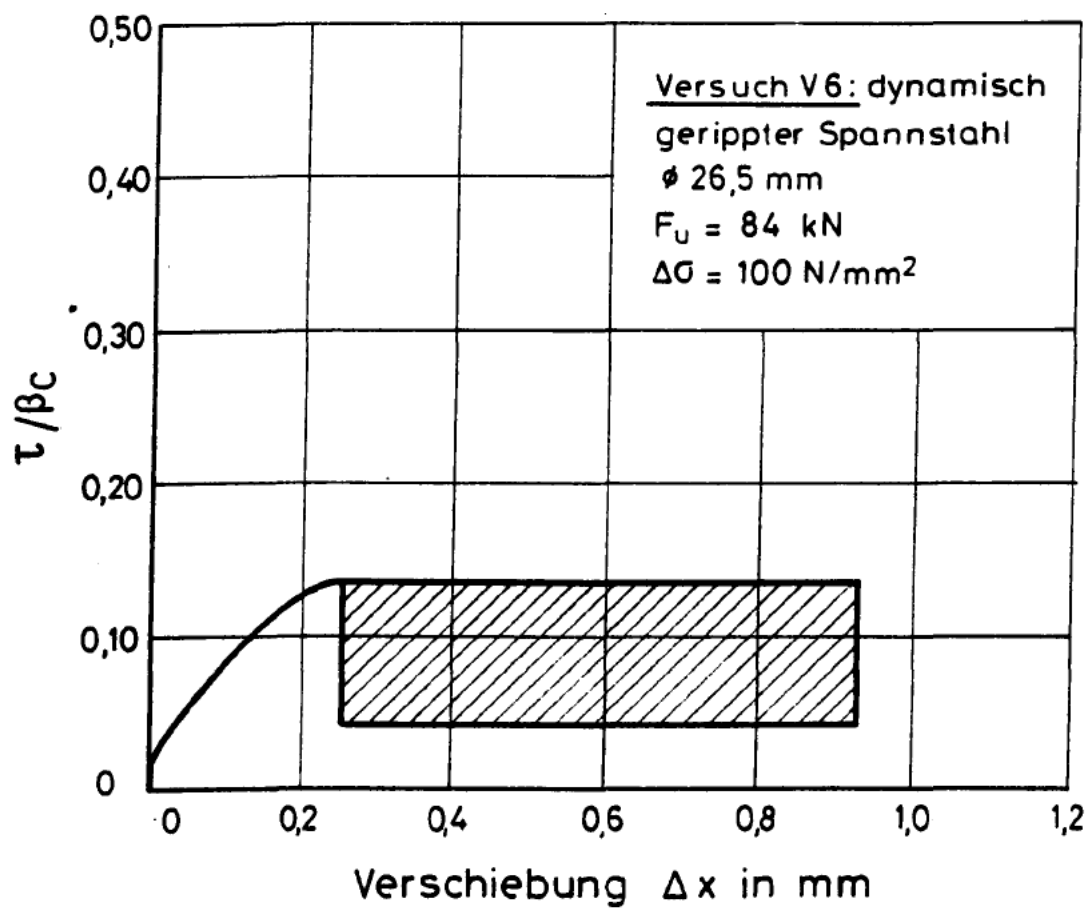
Anlage 3: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung
bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



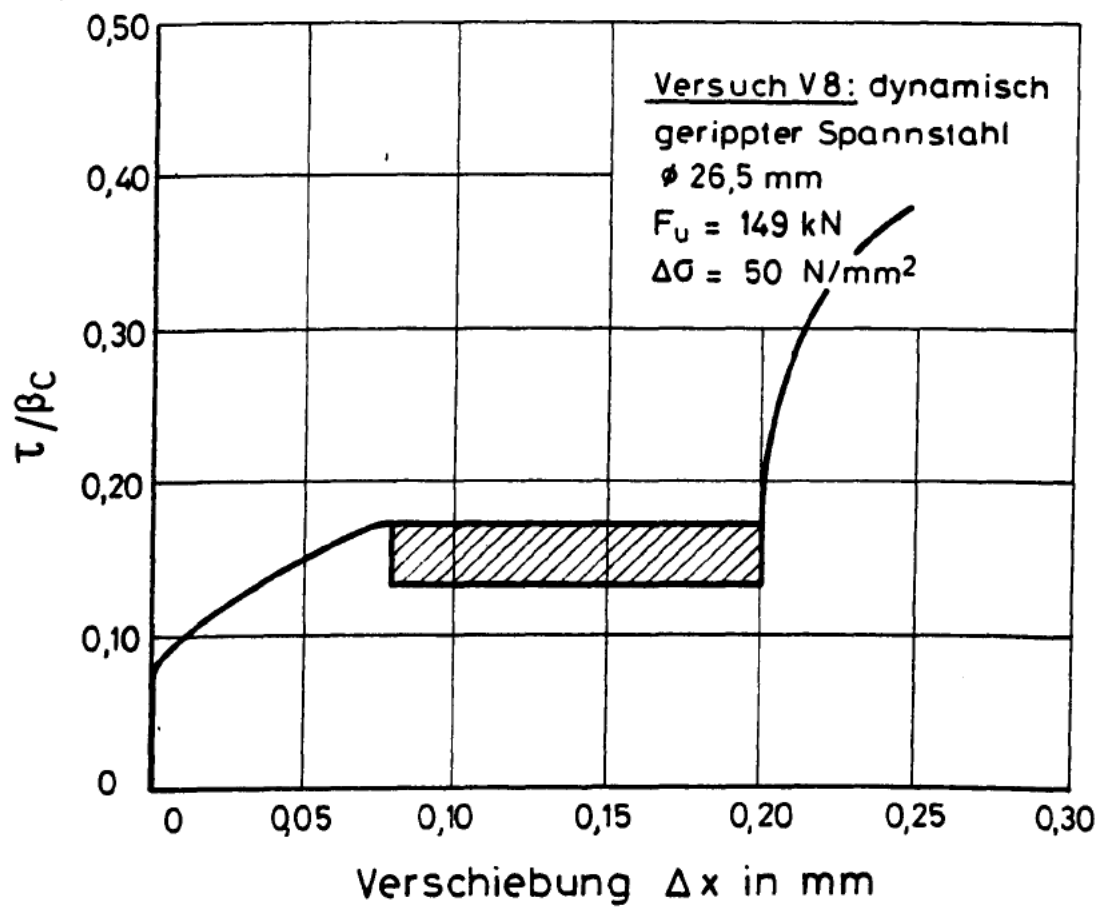
Anlage 4: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



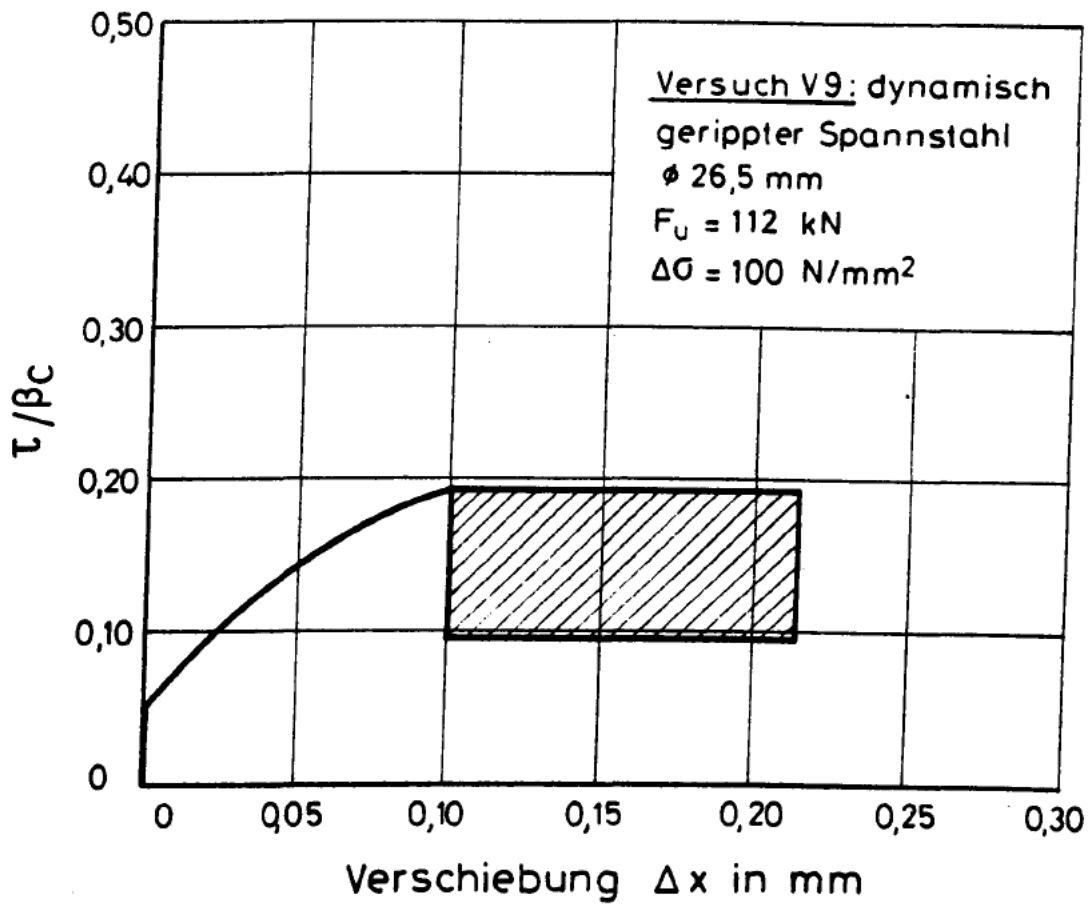
Anlage 5: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung
bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



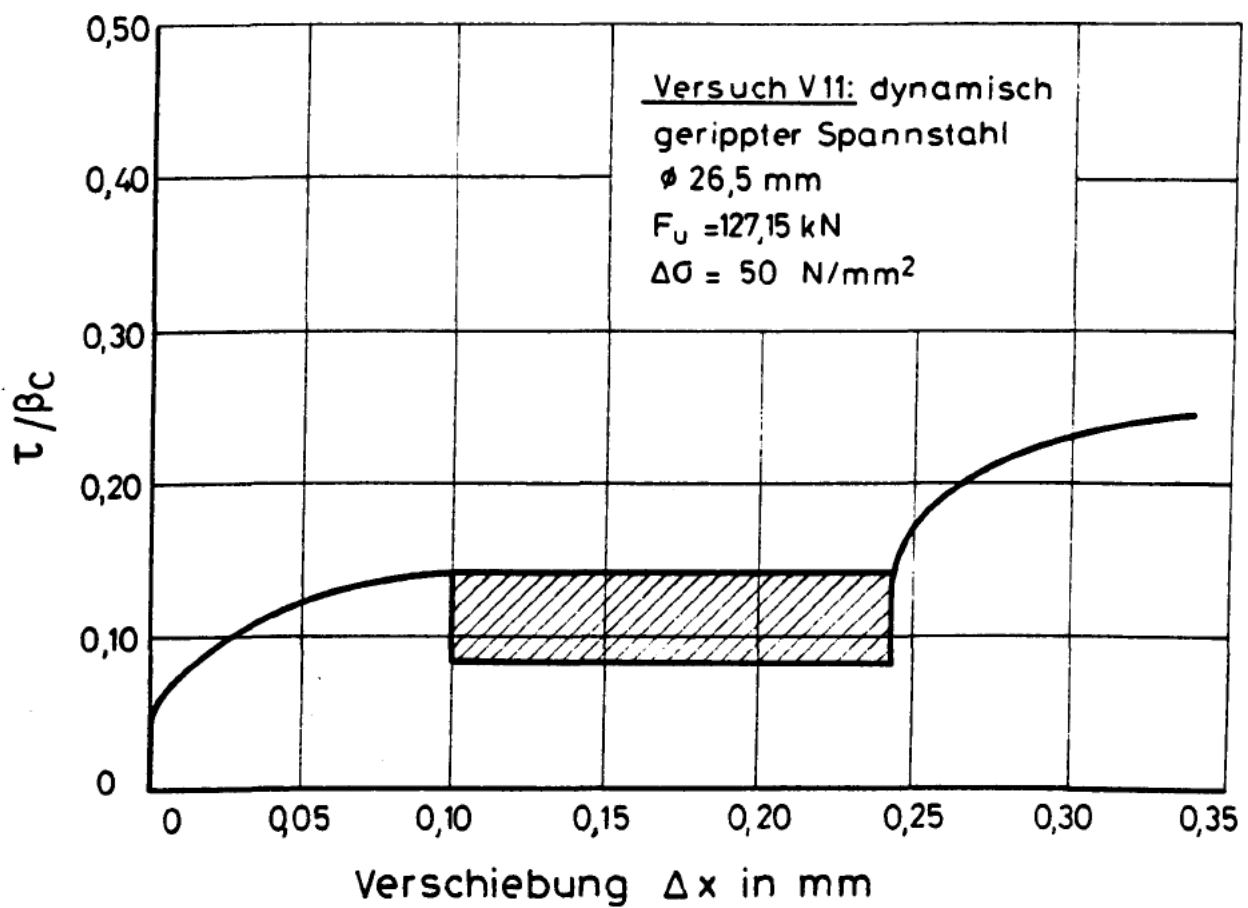
Anlage 6: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



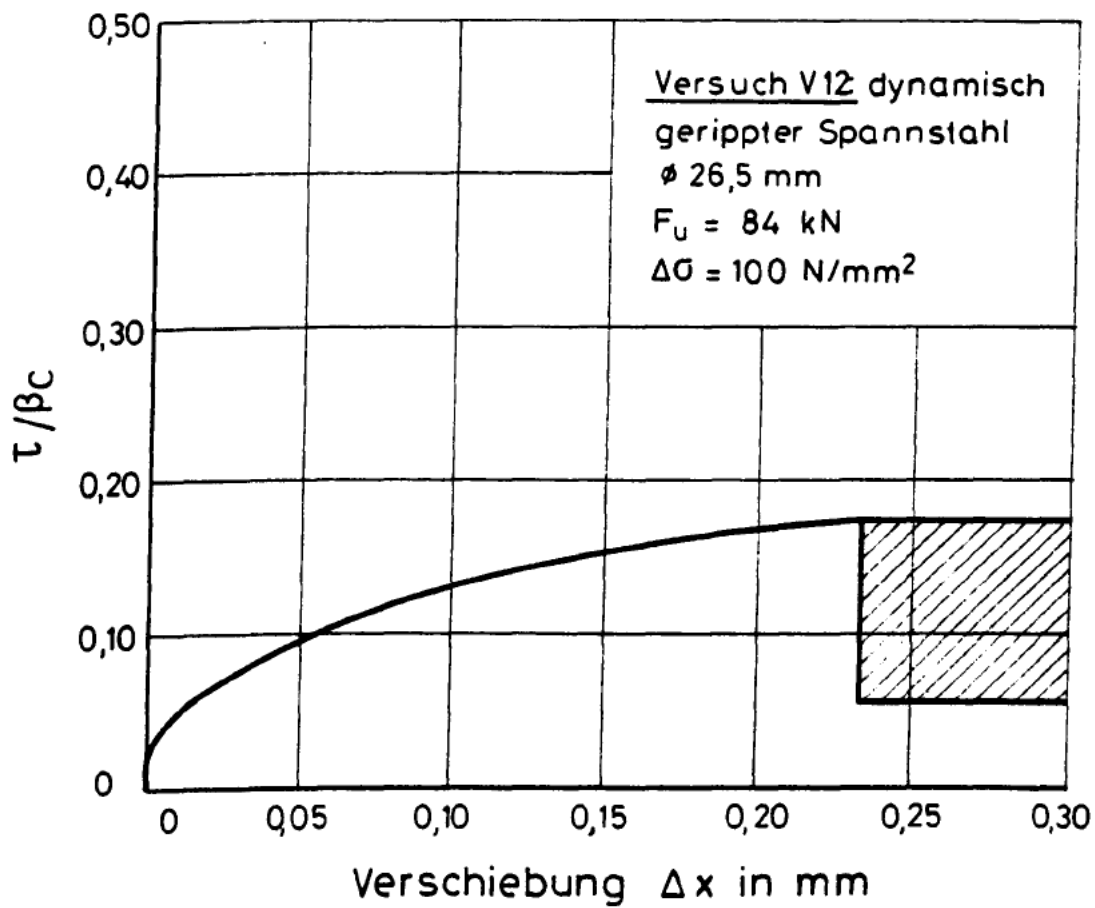
Anlage 7: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



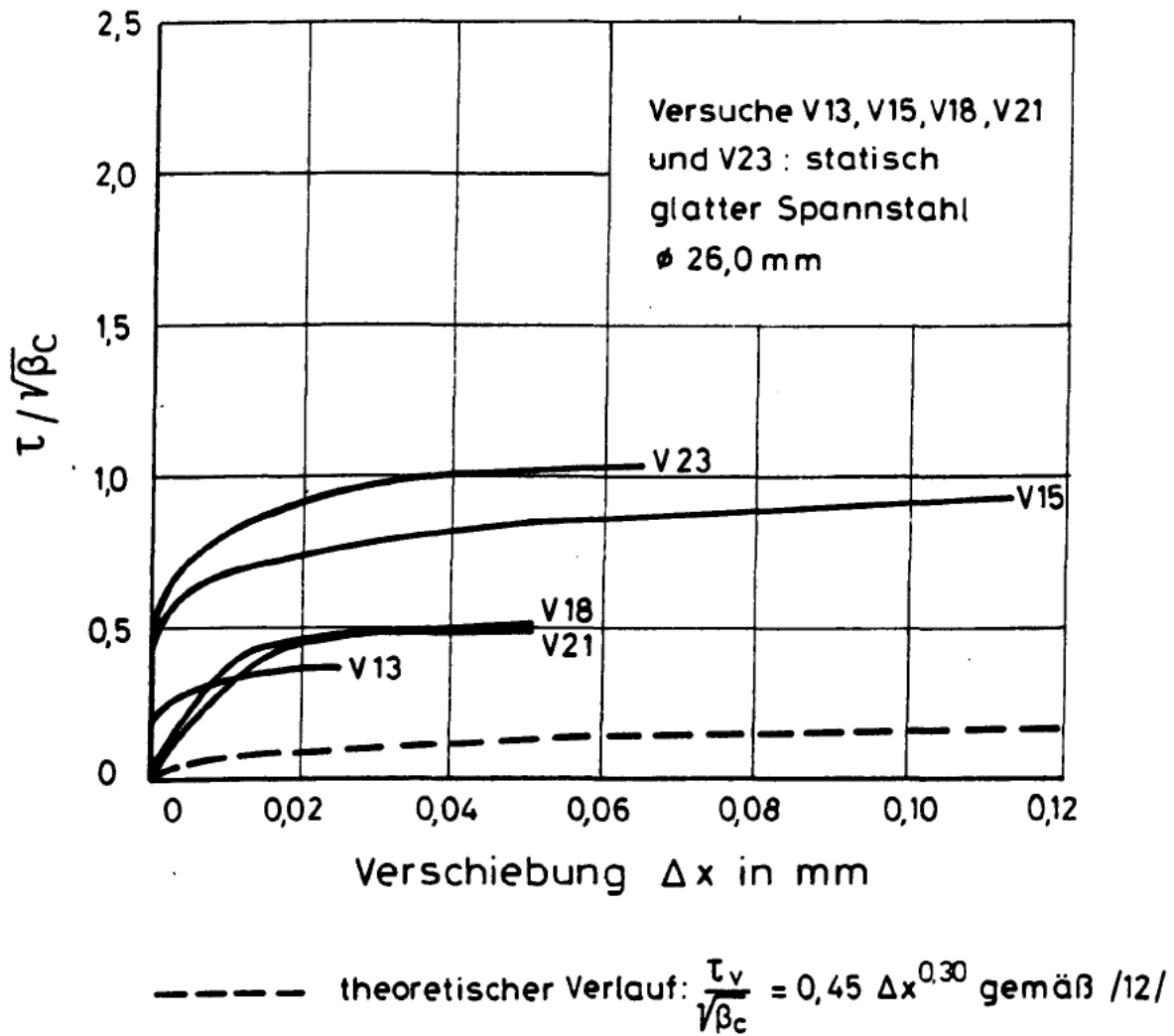
Anlage 8: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



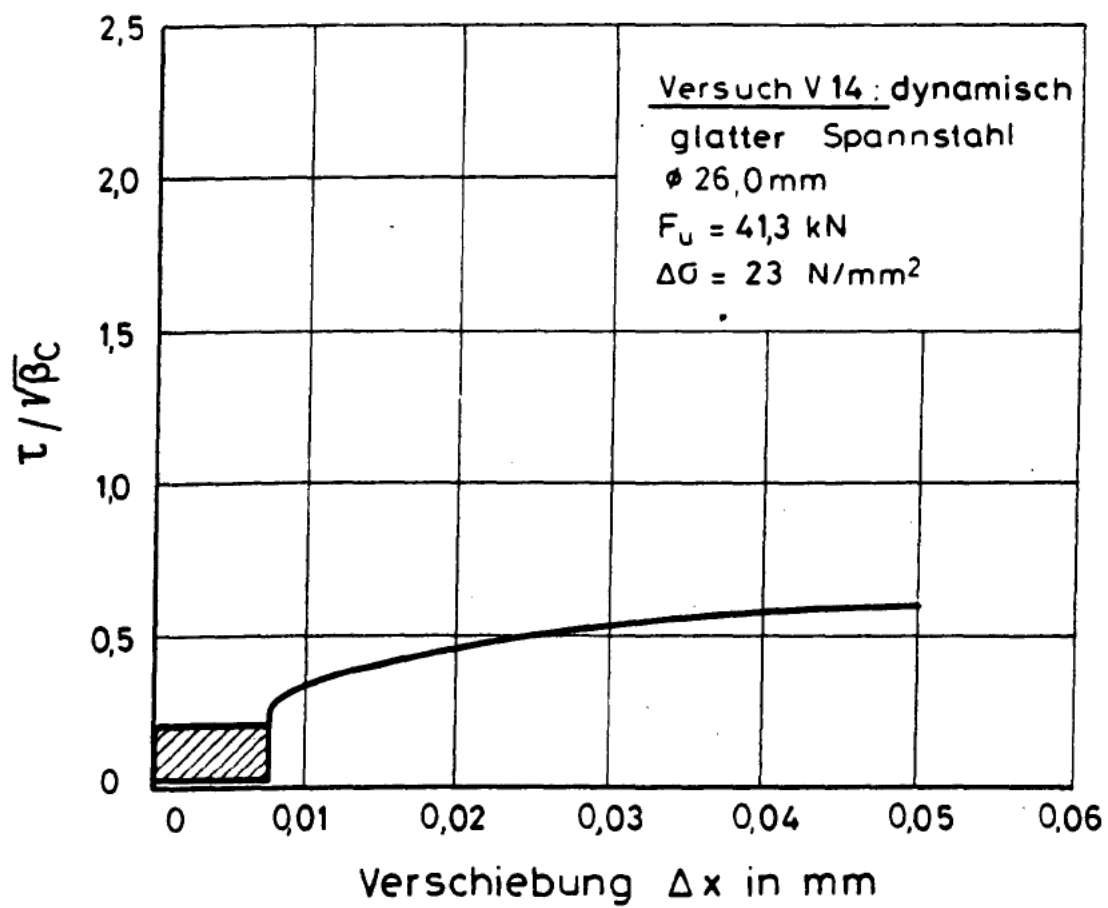
Anlage 9: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung
bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



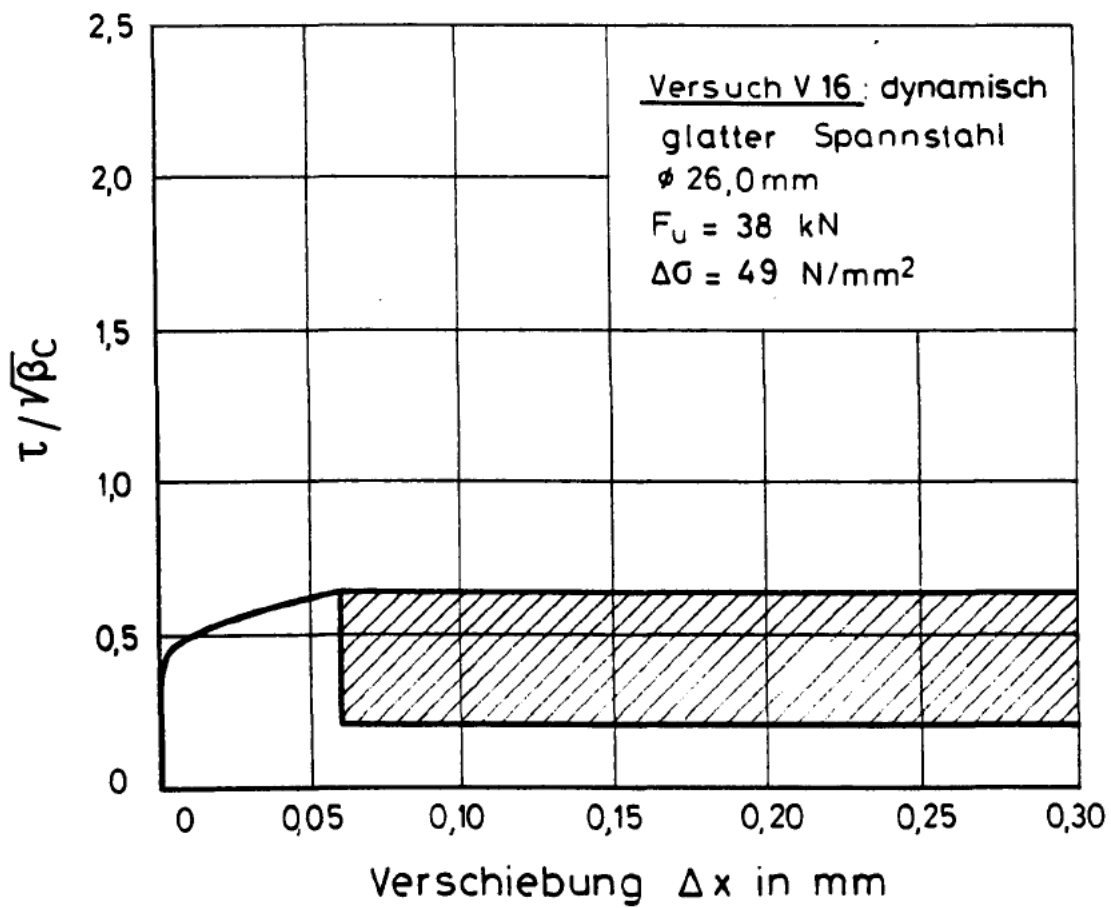
Anlage 10: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung
bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



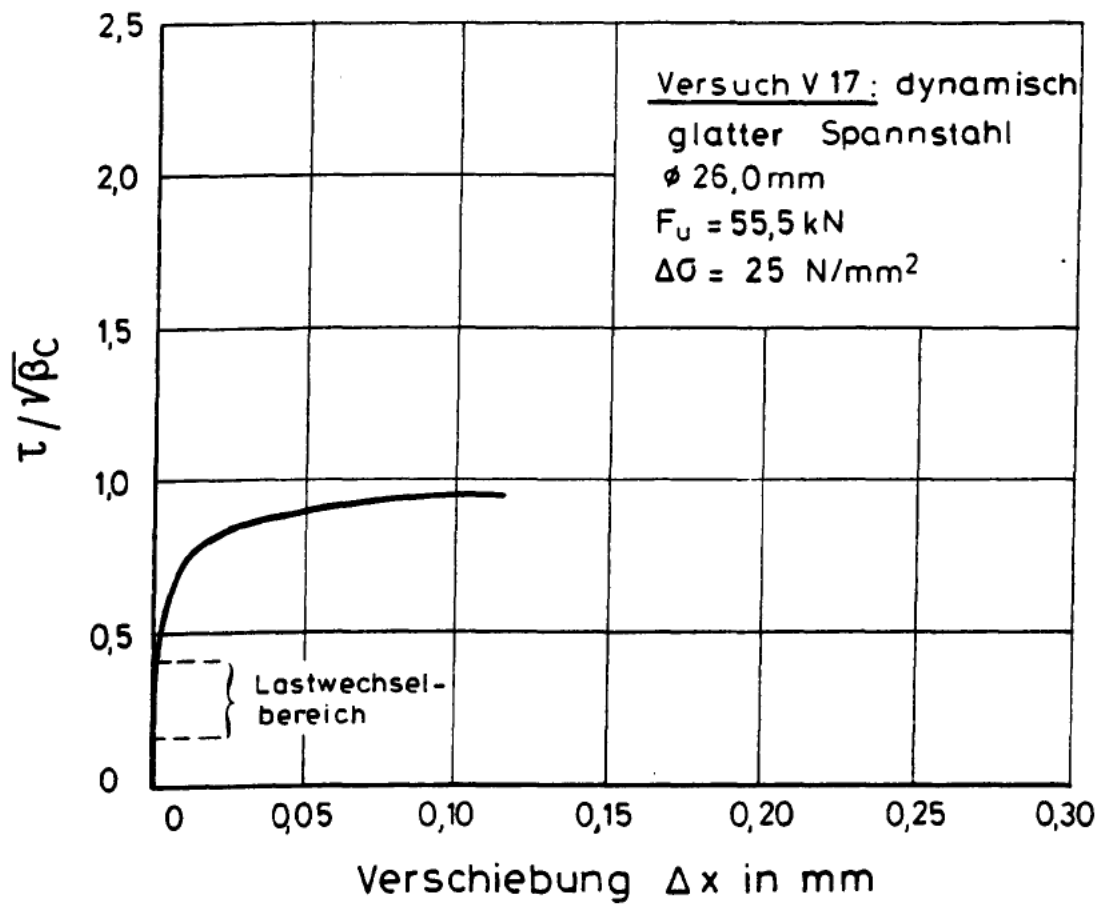
Anlage 11: Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehungen der statischen Ausziehversuche im Vergleich zu den Ergebnissen von /12/



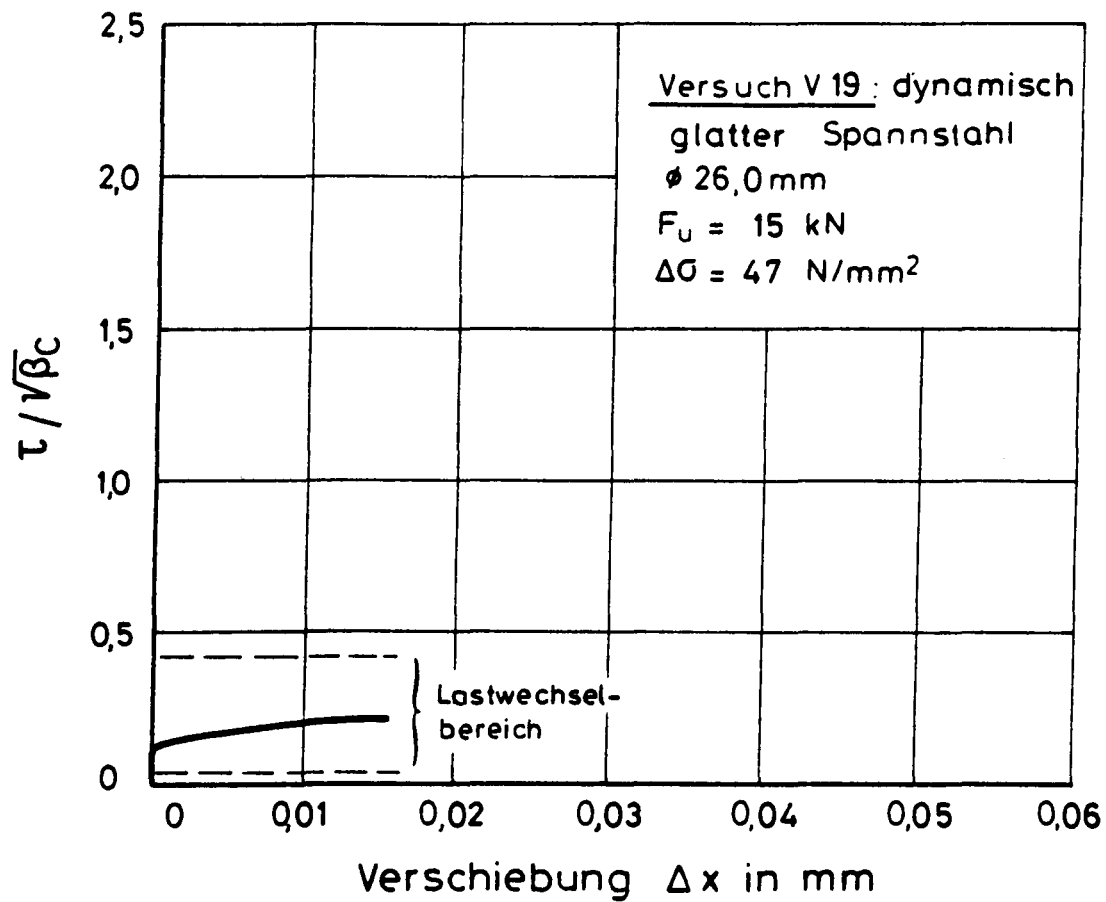
Anlage 12: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung
bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



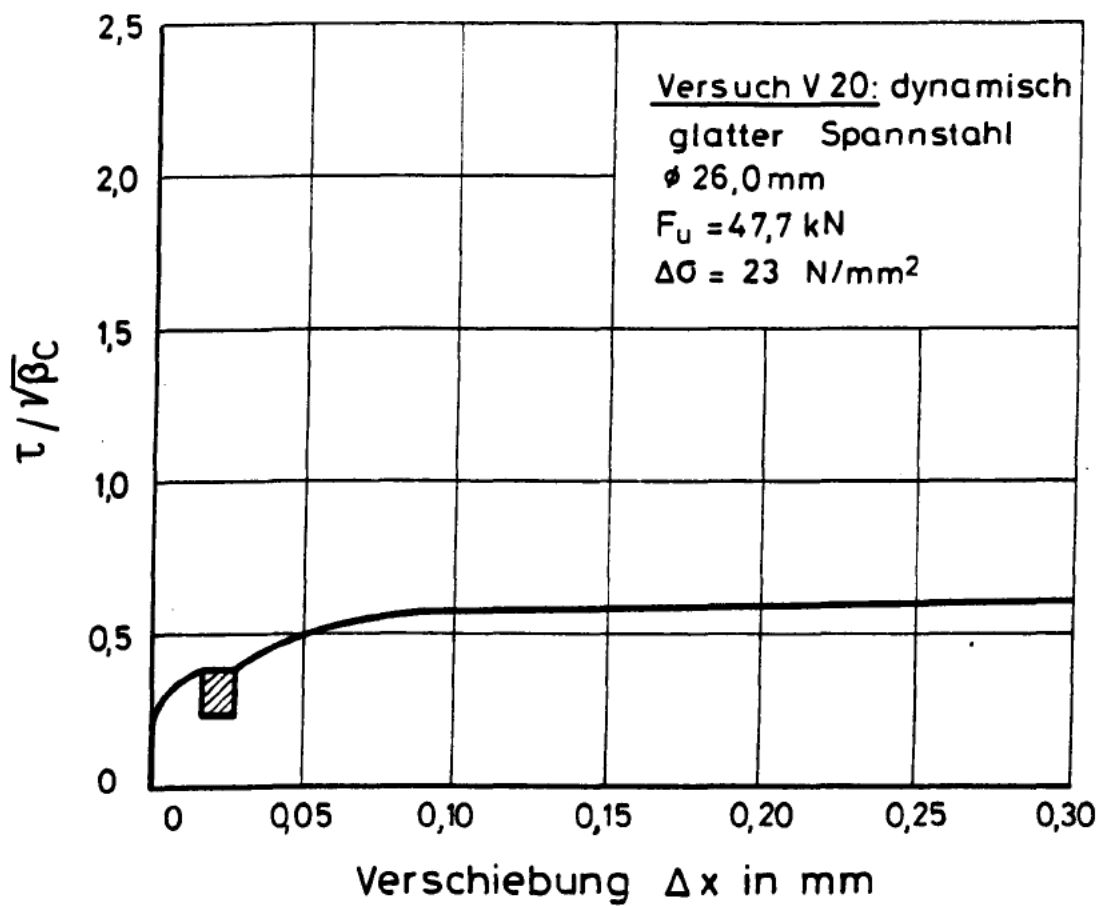
Anlage 13: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



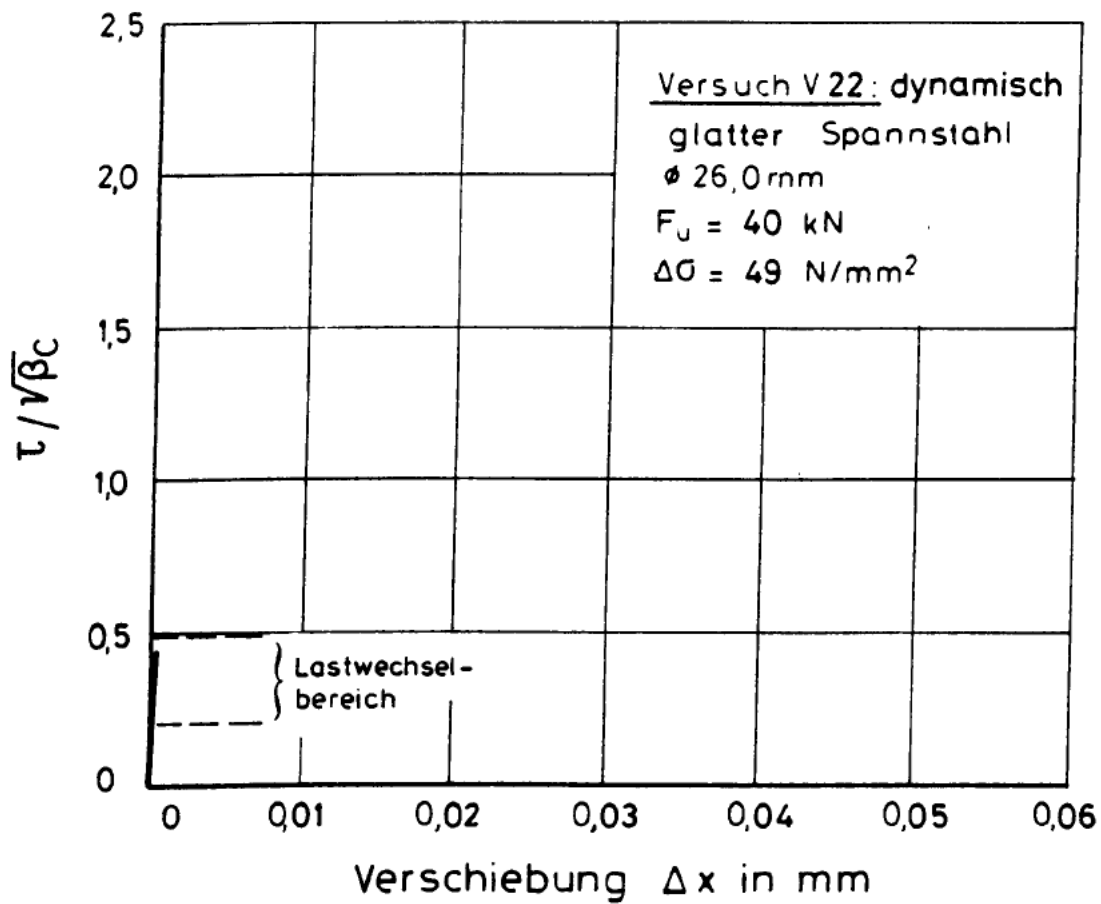
Anlage 14: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



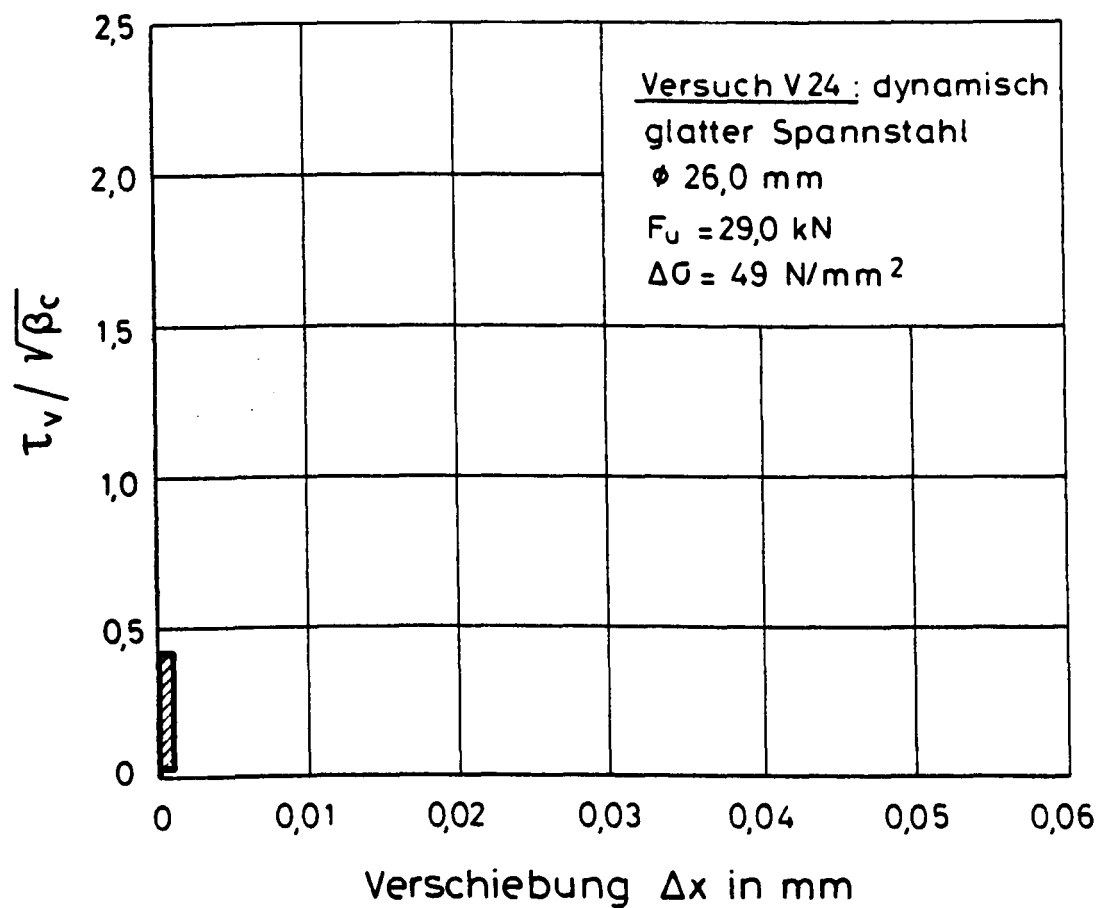
Anlage 15: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



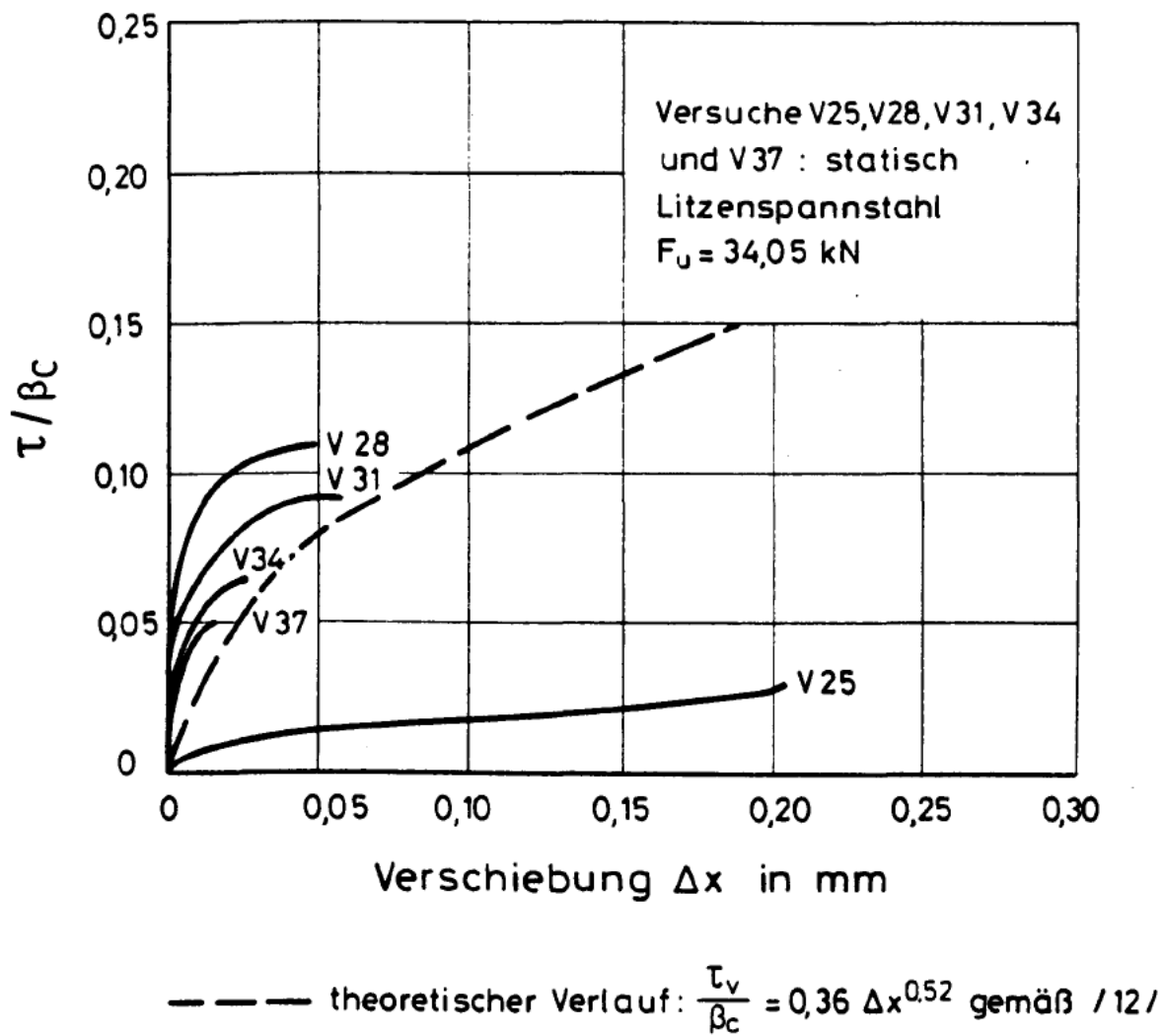
Anlage 16: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung
bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



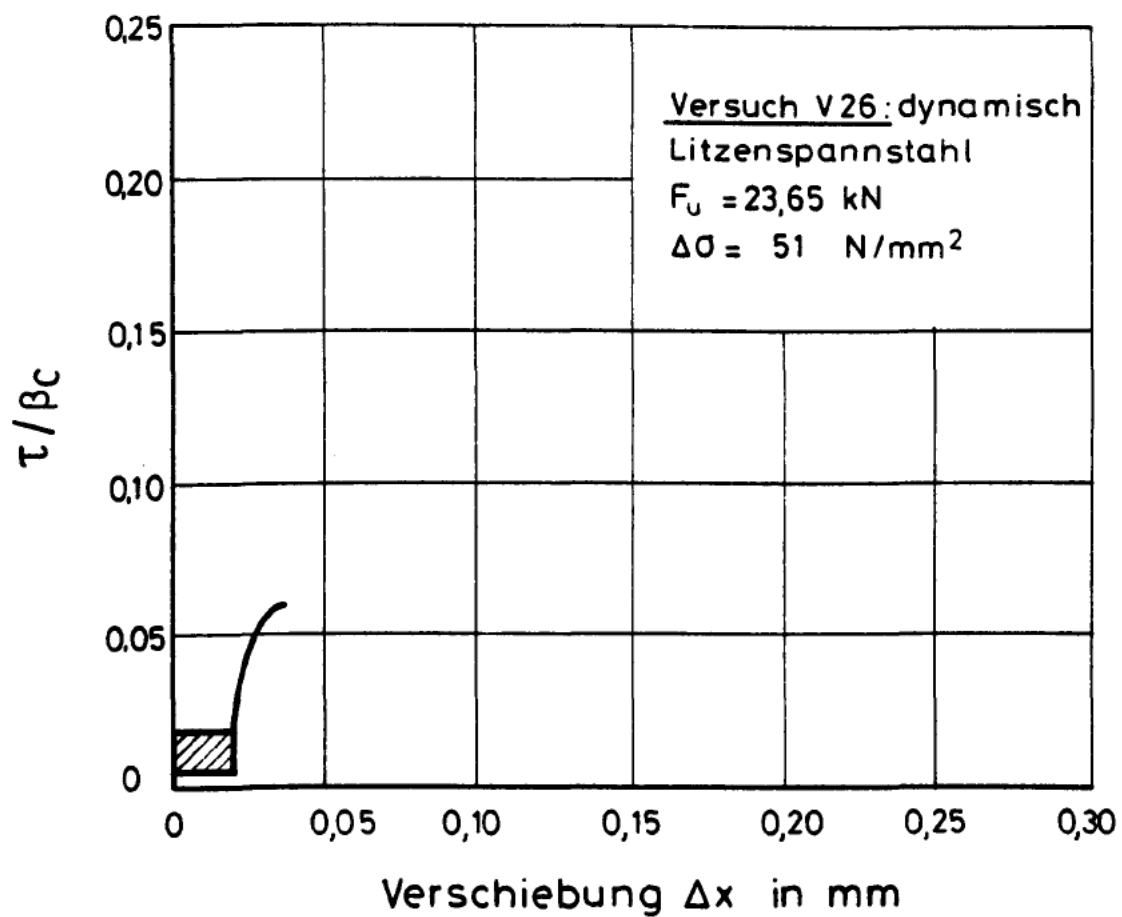
Anlage 17: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



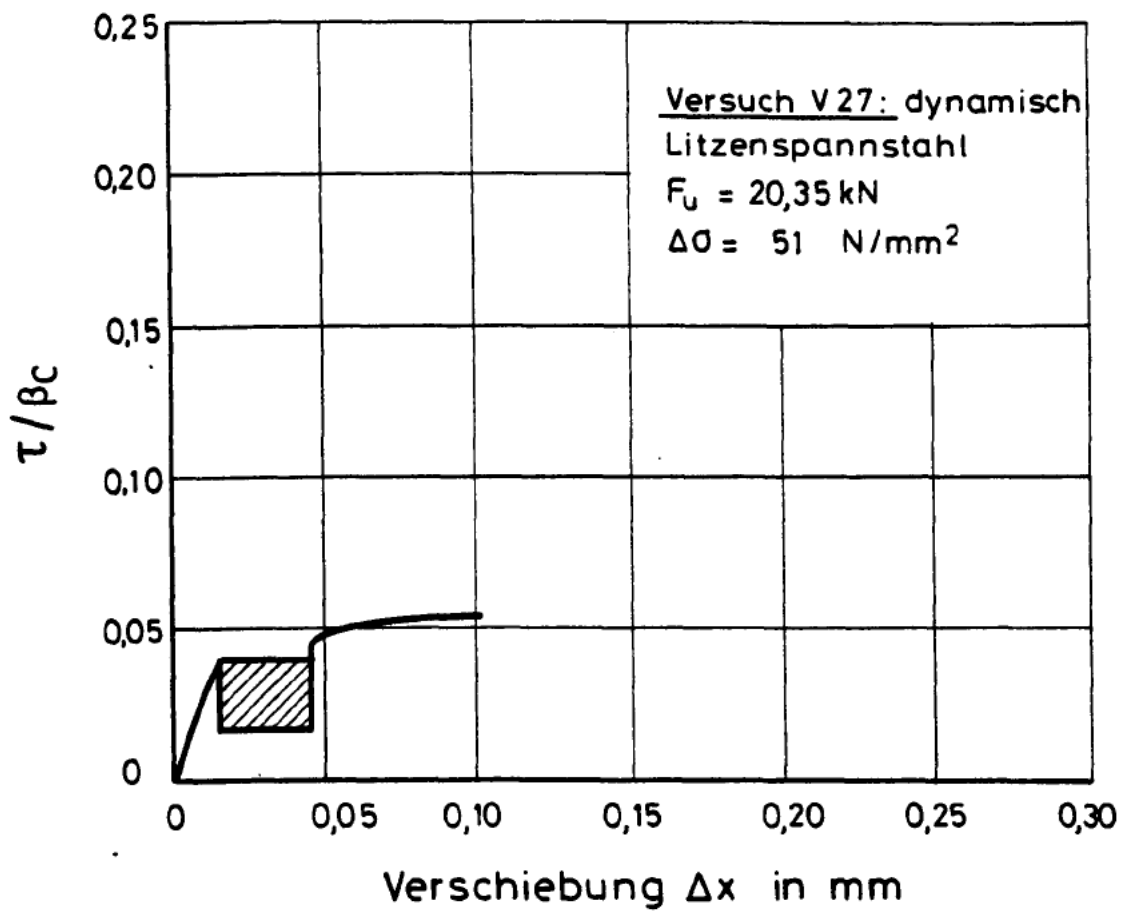
Anlage 18: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung
bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



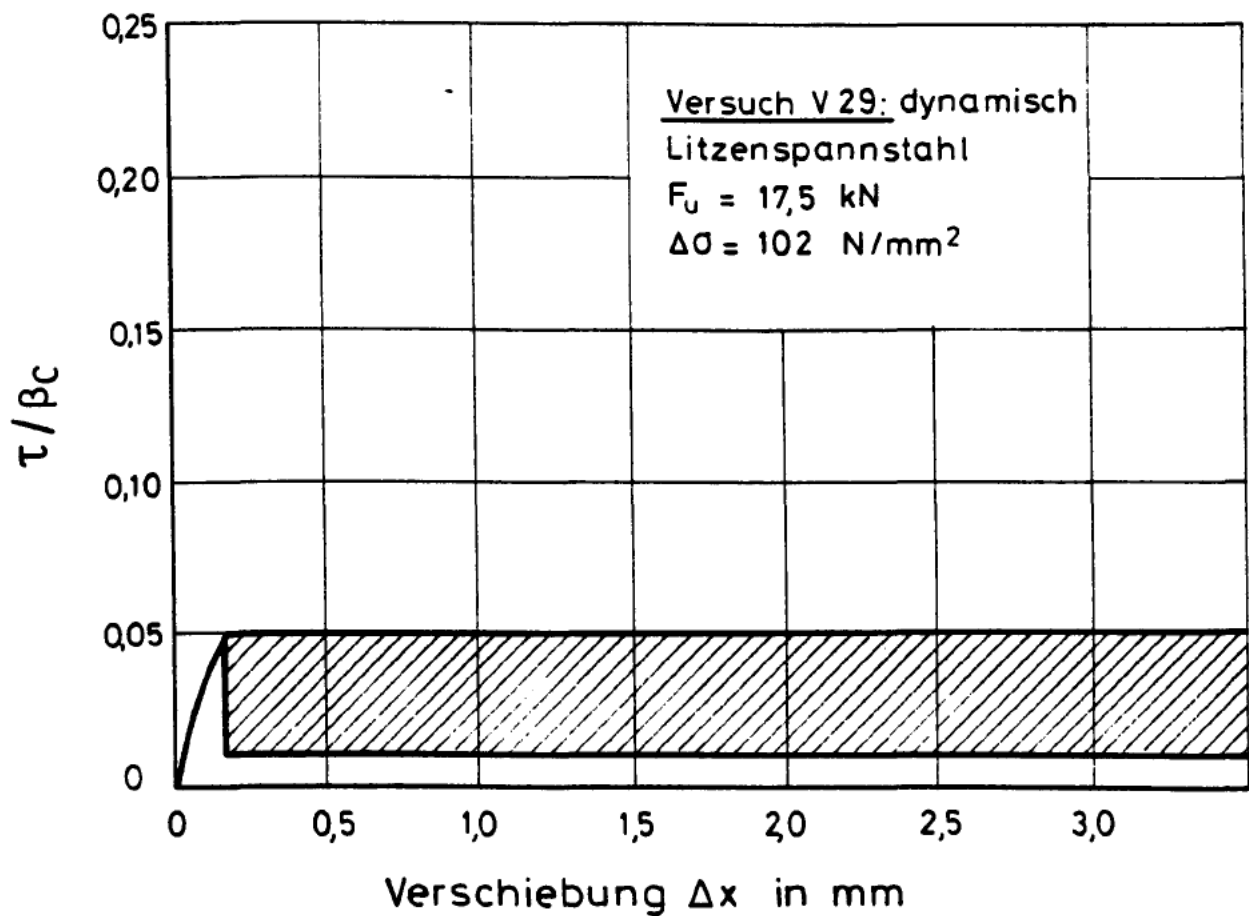
Anlage 19: Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehungen der statischen Ausziehversuche im Vergleich zu den Ergebnissen von /12/



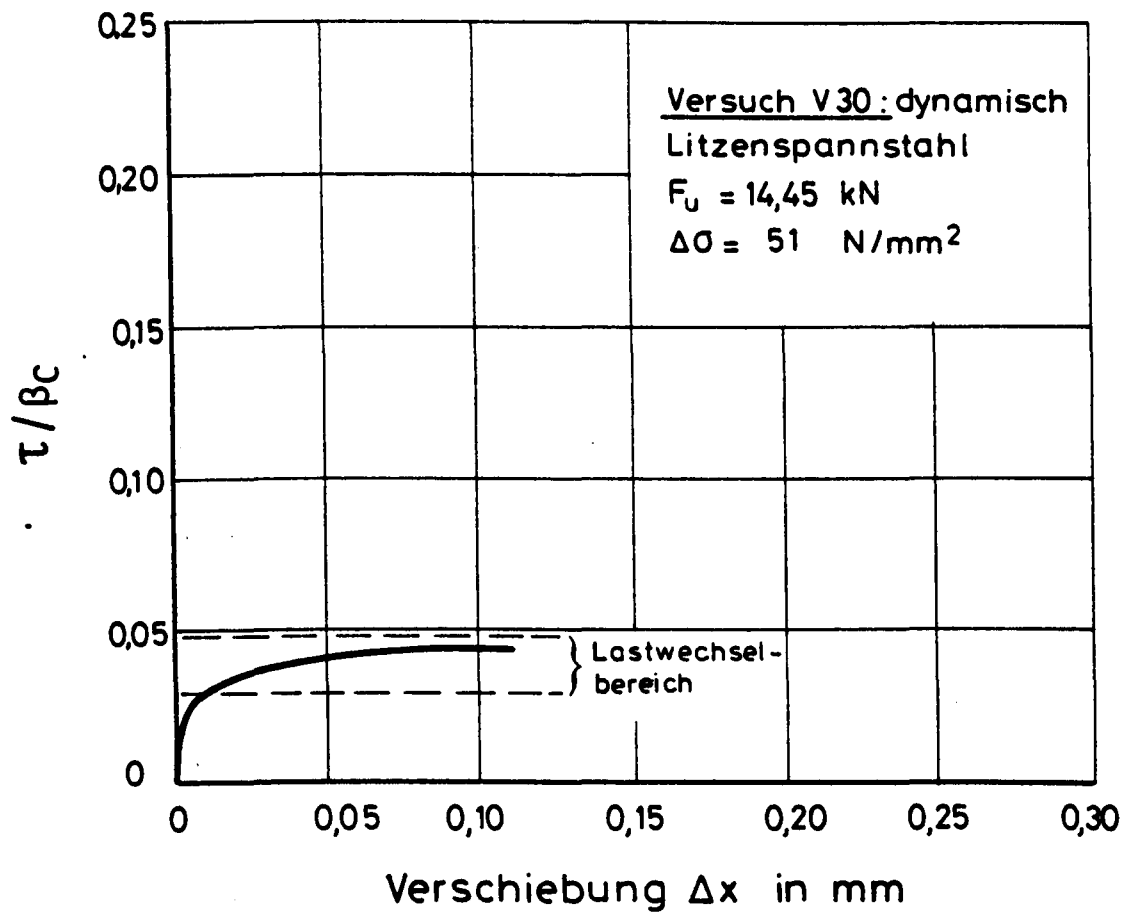
Anlage 20: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung
bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



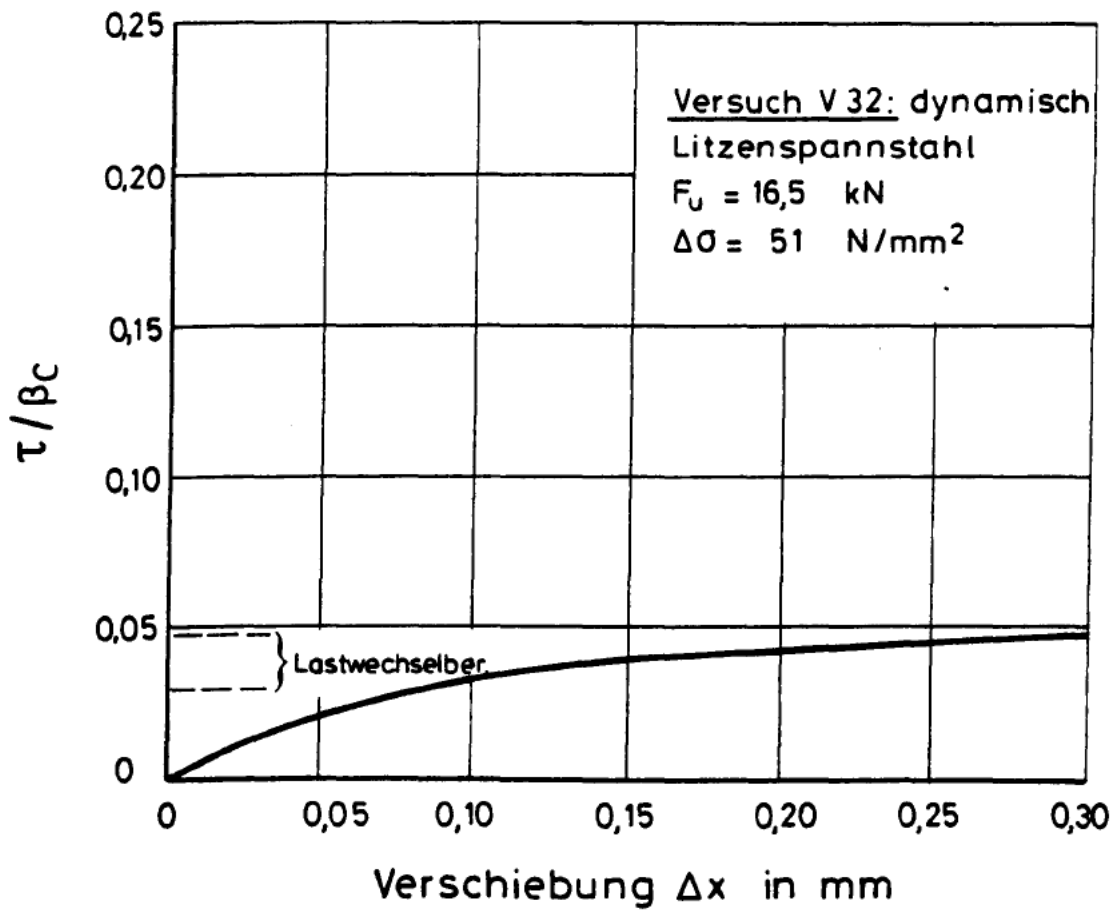
Anlage 21: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung
bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



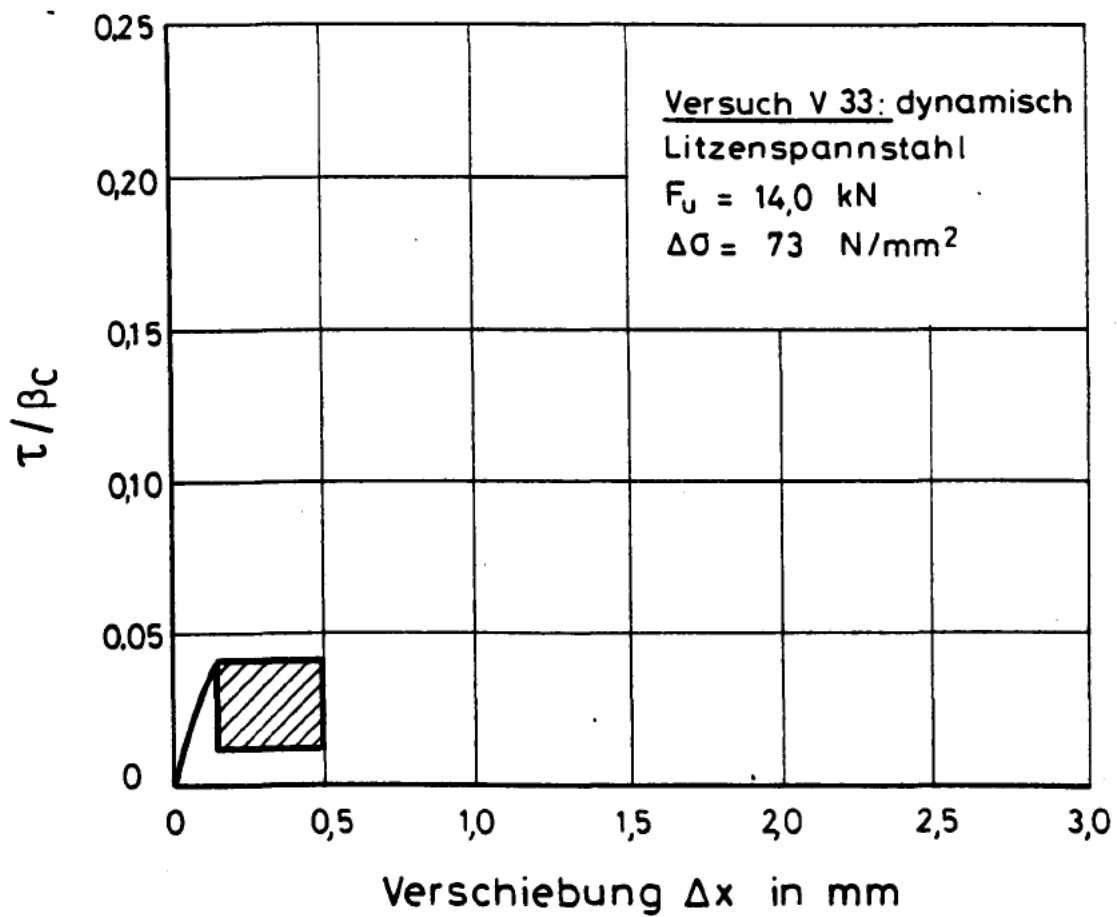
Anlage 22: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



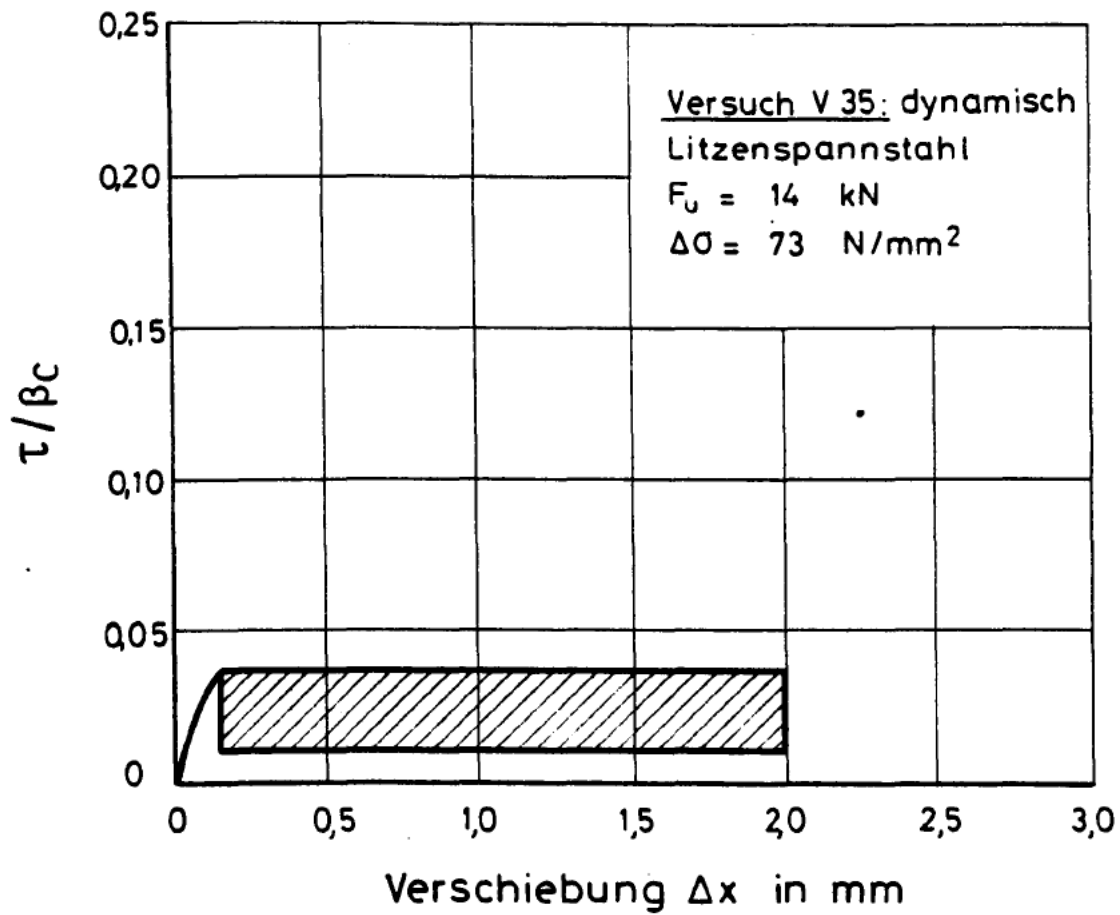
Anlage 23: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



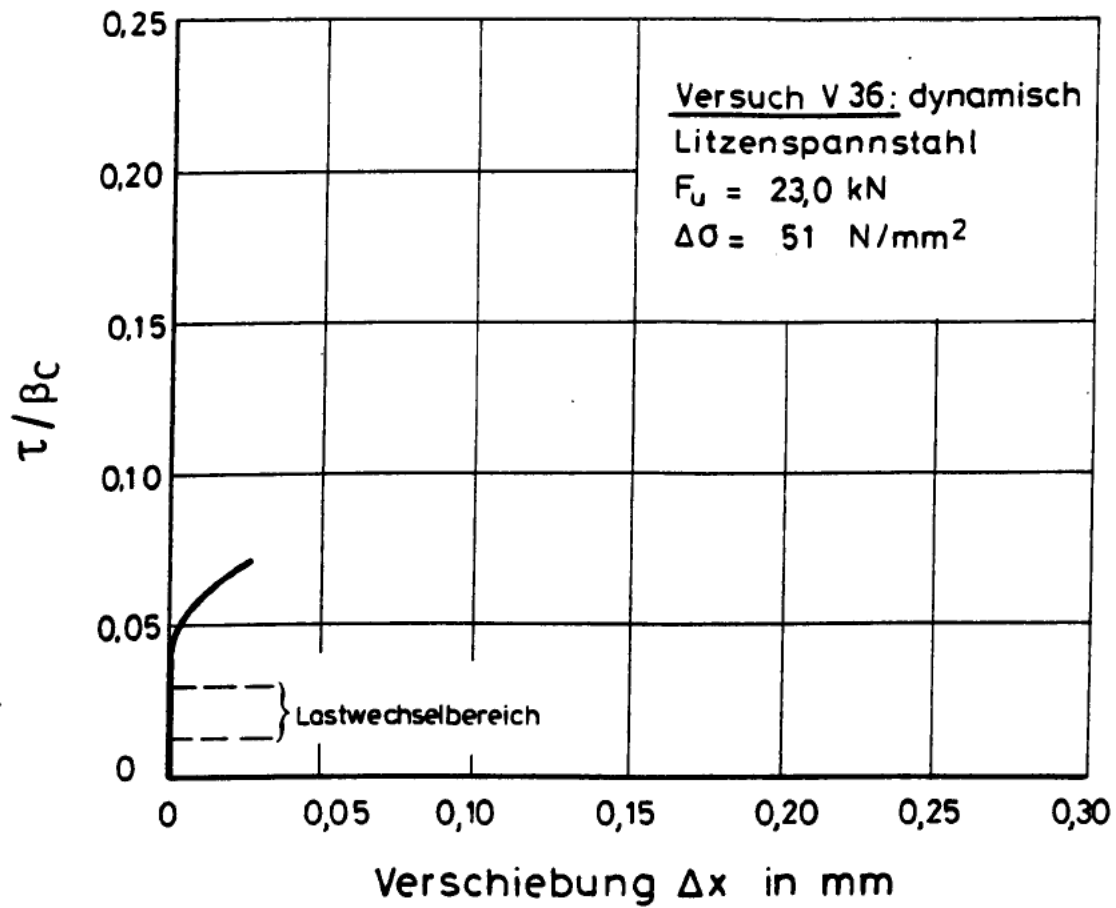
Anlage 24: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung
bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



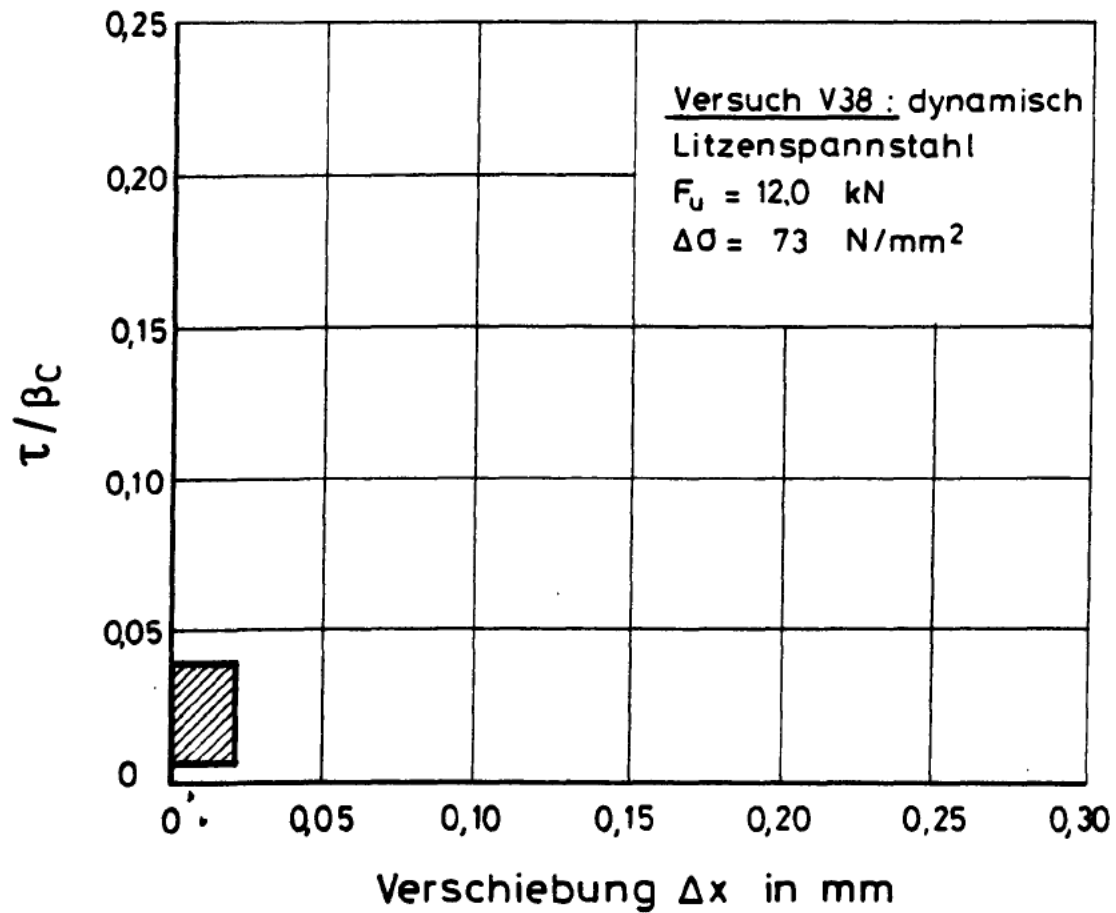
Anlage 25: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



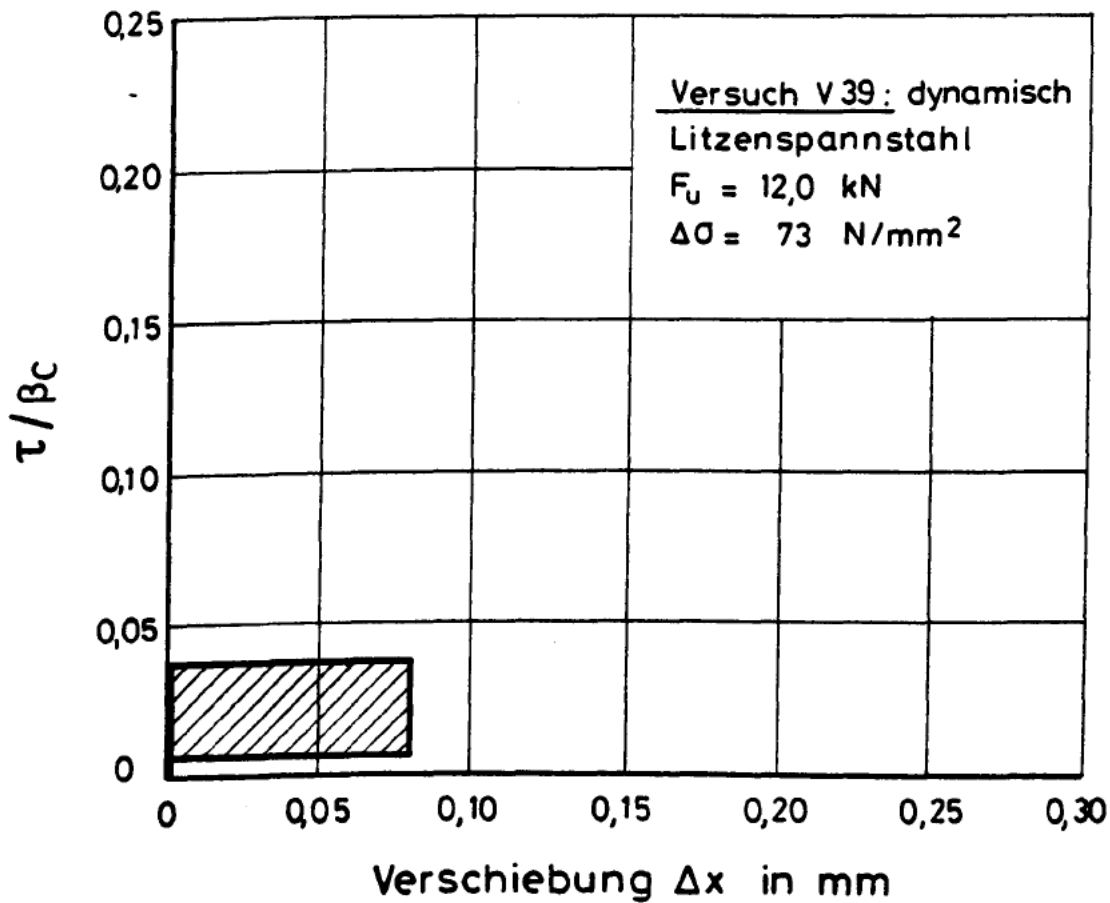
Anlage 26: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung
bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



Anlage 27: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



Anlage 28: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung



DRBBA: 114
Verf: x 096/3

Anlage 29: Gemessene Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehungen bei einwirkender Dauerschwellbeanspruchung

30-0106/001